

MODELIZACIÓN DE PROBLEMAS AMBIENTALES EN ENTORNOS URBANOS

DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN CIUDADES ANDINAS

Juan Pablo Londoño Linares

Director

José Juan de Felipe i Blanch

Barcelona, Mayo De 2015



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

INSTITUT UNIVERITARI DE RECERCA EN
CIÈNCIA I TECNOLOGIES DE LA SOSTENIBILITAT (IS.UPC)

PROGRAMA DE DOCTORADO EN SOSTENIBILIDAD

**MODELIZACIÓN DE PROBLEMAS AMBIENTALES EN
ENTORNOS URBANOS
DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN CIUDADES ANDINAS**

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la
Universitat Politècnica de Catalunya

Autor
Juan Pablo Londoño Linares

Director
José Juan de Felipe i Blanch

Barcelona, Mayo De 2015

RESUMEN

La literatura disponible de evaluación de riesgo por deslizamiento es menor que la disponible en temas de zonificación de la amenaza; una razón es la dificultad inherente a la *evaluación cuantitativa del riesgo* por deslizamiento, operación que requiere la evaluación previa de la susceptibilidad y amenaza, además de una estimación de la vulnerabilidad. Cuando existen evaluaciones, pocas veces llegan a influir en la planificación del territorio, pues falta claridad en la conexión entre modelos de amenaza/riesgo y la toma de decisiones, especialmente en cuanto a las intervenciones necesarias en la definición de usos del suelo. En la investigación desarrollada se ha revisado la literatura disponible, extractando cuatro metodologías para valoración cuantitativa de susceptibilidad a deslizamientos, las cuales se han modificado para ser aplicadas a contextos urbanos andinos. Parte de la adaptación realizada es la propuesta de inclusión de factores de propensividad relacionados con la actividad antrópica, importante en contextos urbanos, o en general, en entornos poblados. Se ha desarrollado una propuesta metodológica para generar modelos de susceptibilidad a deslizamientos a diferentes escalas, lo cual representa el componente espacial de la amenaza. Adicionalmente se propone la inclusión del factor temporal de la amenaza mediante el análisis pluviométrico a partir de umbrales de lluvia crítica detonante de deslizamientos, con lo cual se llega a un modelo de amenaza a escalas urbanas, en términos probabilistas. Por último, se propone una métrica para derivar mapas de riesgo como insumos para el ordenamiento territorial, acuñando el término riesgo tácito, como herramienta de gestión, para llevar modelos de riesgo (técnicos) a la toma de decisiones (gestión), en función de intervenciones en los usos del suelo.

En cuanto a contribuciones concretas producto de esta investigación, a una escala de trabajo regional se han elaborado los modelos de susceptibilidad para la cuenca del río Chinchiná (Caldas, Colombia), como insumos para el Plan de Ordenamiento Ambiental de la misma. En la escala urbana se han elaborado los modelos de susceptibilidad, amenaza, riesgo implícito y pérdidas esperadas para la ciudad de Manizales (Colombia), como insumo para el Plan de Ordenamiento Territorial.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Española de Cooperación Internacional AECID, por el otorgamiento de la beca Mutis entre 2006 y 2008, sin la cual no hubiese sido posible emprender este proyecto.

Al Doctor Jose Juan de Felipe i Blanch, quien se encargó de despertar mi interés por la modelización de fenómenos complejos y me acogió en su grupo de investigación de Medida y Modelización de la Sostenibilidad, en la UPC, y ha tenido la paciencia y dedicación necesaria para orientar este trabajo.

A la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad y al Sustainability Measuring and Modelling SUMM Lab, con quienes compartimos intereses de investigación comunes y muchas conversaciones que de alguna manera están reflejadas en estas páginas. Especialmente a Xavier Álvarez del Castillo y Jaume Cendra Jarreta, quienes aportaron a expandir mi visión ingenieril del mundo.

Al grupo de Gestión del Riesgo RAG del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, especialmente a los profesores Alex Barbat y Liliana Carreño, con quienes he tenido la valiosa oportunidad de colaborar en múltiples proyectos relacionados con la Gestión del Riesgo entre 2006 y 2015.

A todo el personal del proyecto *“Aunar esfuerzos para mejorar la gestión del riesgo en la planificación y la toma de conciencia en el municipio de Manizales”*, de la Universidad Nacional de Colombia, con quienes tuve la oportunidad de compartir dos años de investigación aplicada. Especialmente se agradece al profesor Omar Darío Cardona Arboleda, director del proyecto, por hacer posible mi participación dentro del mismo, y con ello la aplicación de esta investigación a un fin práctico como es la generación de modelos de riesgo urbano para el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Manizales y el Plan de Ordenación Ambiental de la Cuenca del río Chinchiná.

A todos mis compañeros de trabajo durante estos últimos años, con quienes he tenido el privilegio de coincidir; en especial a Miguel Mora, Jairo Valcárcel, Juan Camilo Olaya, Juan Pablo Forero, Sergio Forero y Gabriel Bernal, por todas las horas y charlas compartidas.

Por último, agradezco especialmente a Paula Cifuentes, por ser mi continuo apoyo y haberme acompañado en todo este camino que empezó una tarde soleada de 2006 en Barcelona.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RIESGO Y DESASTRES	1
1.1.1. <i>Ciencias naturales y técnicas</i>	1
1.1.2. <i>Perspectiva económica</i>	2
1.1.3. <i>La psicología de la percepción del riesgo</i>	2
1.1.4. <i>Conceptos desde lo social y cultural</i>	3
1.1.5. <i>Comentarios sobre los diferentes enfoques</i>	4
1.1.6. <i>Definición de Riesgo desde la perspectiva de los desastres</i>	6
1.2. DESASTRES Y DESARROLLO	8
1.2.1. <i>Riesgos como problemas no resueltos del desarrollo</i>	11
1.2.2. <i>Modelos de desarrollo y riesgos</i>	18
1.3. URBANIZACIÓN, ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y RIESGOS	23
1.3.1. <i>Urbanización en Colombia y segregación urbana</i>	25
1.3.2. <i>Ordenación Urbana en Colombia</i>	28
1.3.3. <i>Incorporación del riesgo en el Ordenamiento Territorial</i>	32
1.4. PRM Y ORDENAMIENTO DEL TERRITORIO	35
1.4.1. <i>Remoción en Masa</i>	37
1.4.2. <i>Zonificación de amenaza y riesgo para el OT</i>	40
1.4.3. <i>Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo por deslizamiento</i>	42
1.4.4. <i>Métodos de zonificación</i>	43
1.4.4.1. Mapas de inventarios	43
1.4.4.2. Análisis de distribución de PRM	44
1.4.4.3. Análisis de actividad de PRM	44
1.4.4.4. Análisis de densidad de PRM	44
1.4.4.5. Mapas de susceptibilidad	44
1.4.4.6. Métodos determinísticos	45
1.4.4.7. Métodos heurísticos	46
1.4.4.8. Métodos probabilísticos y estadísticos	47
1.4.4.9. Métodos geomorfológicos	49
1.4.4.10. Mapas de peligro	50
1.4.4.11. Mapas de riesgo	50
1.4.5. <i>Revisión de la literatura</i>	52
1.5. SÍNTESIS Y JUSTIFICACIÓN	64
1.5.1. <i>Necesidad de estudios de riesgos a escalas urbanas</i>	64
1.5.2. <i>Necesidad de adaptación de metodologías e incorporación de factores antrópicos</i>	65
1.5.3. <i>Necesidad de incorporación de estudios de amenaza y riesgo en el OT</i>	65

1.6.	IMPACTO ESPERADO	66
1.7.	OBJETIVO PRINCIPAL	66
1.8.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	67
CAPITULO 2.	MATERIALES Y MÉTODOS	68
2.1.	ÁREAS DE ESTUDIO	68
2.1.1.	<i>Cuenca del río Chinchiná</i>	70
2.1.2.	<i>Municipio de Manizales</i>	71
2.1.3.	<i>Aspectos Geomorfológicos, Topográficos Y Pluviométricos</i>	74
2.2.	MARCO CONCEPTUAL	80
2.3.	INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS	82
2.4.	FACTORES DE PROPENSIVIDAD	82
2.4.1.	<i>Factores naturales</i>	84
2.4.1.1.	Elevación del terreno	84
2.4.1.2.	Pendiente	85
2.4.1.2.1.	Pendiente del terreno	85
2.4.1.2.2.	Pendiente senoidal de las laderas	86
2.4.1.3.	Orientación de las laderas / Insolación	87
2.4.1.3.1.	Orientación de las laderas	87
2.4.1.3.2.	Insolación del terreno	87
2.4.1.4.	Rugosidad del Terreno	88
2.4.1.5.	Curvatura de la Superficie	88
2.4.1.5.1.	Curvatura: Convexidad/concavidad espacial del terreno	88
2.4.1.5.2.	Convexidad/concavidad longitudinal	89
2.4.1.5.3.	Convexidad/concavidad Transversal	90
2.4.1.6.	Características de la cuenca vertiente	91
2.4.1.6.1.	Área de Cuenca Acumulada	91
2.4.1.6.2.	Longitud de Cuenca Acumulada	91
2.4.2.	<i>Tipo de suelo y Litología</i>	92
2.4.2.1.	Geología	92
2.4.2.2.	Geomorfología	92
2.4.2.3.	Formaciones Superficiales	92
2.4.2.4.	Coberturas y Usos del Suelo	92
2.4.3.	<i>Influencia antrópica</i>	93
2.4.3.1.	Factores socio-demográficos	93
2.4.3.1.1.	Densidad poblacional neta	93
2.4.3.1.2.	Densidad poblacional bruta	93
2.4.3.1.3.	Habitantes en un radio de 50m	94
2.4.3.1.4.	Densidad neta de viviendas	94
2.4.3.1.5.	Número de viviendas en un radio de 50m	94
2.4.3.2.	Factores socio-económicos	94
2.4.3.2.1.	Nivel socioeconómico de los habitantes	95

2.4.4.	<i>Mitigación</i>	95
2.4.4.1.1.	Tratamientos Superficiales	95
2.4.5.	<i>Distancia a elementos clave</i>	95
2.4.5.1.	Distancia a vías	95
2.4.5.2.	Distancia a red de acueducto y distancia a red de alcantarillado	95
2.4.5.3.	Distancia a fallas y lineamientos	96
2.4.5.4.	Distancia a cauces de ríos y quebradas	96
2.5.	MUESTRA DE ANÁLISIS	96
2.6.	MÉTODOS DE AGREGACIÓN	97
2.6.1.	<i>Función discriminante de susceptibilidad a deslizamientos</i>	98
2.6.1.1.	Análisis De Componentes Principales	100
2.6.2.	<i>Método De Funciones De Favorabilidad</i>	101
2.6.3.	<i>Método De Números Difusos</i>	102
2.6.4.	<i>Método de Redes Neuronales Artificiales</i>	103
2.7.	PRUEBAS DE RENDIMIENTO Y SELECCIÓN DEL MODELO DE MEJOR AJUSTE	106
2.8.	INCORPORACIÓN DEL FACTOR DETONANTE: LLUVIAS	108
CAPITULO 3.	APLICACIONES	111
3.1.	CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ	111
3.1.1.	<i>Inventario de deslizamientos</i>	111
3.1.2.	<i>Factores de propensividad</i>	112
3.1.2.1.	Suelos / Geología	114
3.1.2.1.1.	Mapa de cobertura	114
3.1.2.1.2.	Material parental (Geología)	114
3.1.2.1.3.	Procesos geomorfológicos	115
3.1.2.2.	Derivados de la topografía	115
3.1.2.2.1.	Modelo digital de elevaciones	115
3.1.2.2.2.	Pendiente	116
3.1.2.2.3.	Pendiente transformada	116
3.1.2.2.4.	Orientación de las laderas	117
3.1.2.2.5.	Curvatura de la superficie	117
3.1.2.2.6.	Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente	118
3.1.2.2.7.	Curvatura en el sentido de la pendiente	118
3.1.2.2.8.	Área de cuenca vertiente	119
3.1.2.2.9.	Longitud de flujo	119
3.1.2.2.10.	Insolación incidente en el terreno	120
3.1.2.3.	Distancia a elementos clave	120
3.1.2.3.1.	Distancia a fallas y lineamientos	120
3.1.2.3.2.	Distancia a vías y carreteras	121
3.1.2.3.3.	Distancia a centros poblados	121
3.1.2.3.4.	Distancia a ríos y cauces	122
3.1.3.	<i>Muestra de análisis</i>	123

3.1.4. Métodos de agregación	123
3.1.4.1. Función Discriminante De Susceptibilidad A Deslizamientos	123
3.1.4.1.1. Diferentes modelos discriminantes probados	129
3.1.4.1.2. Análisis De Componentes Principales	132
3.1.4.2. Método De Funciones De Favorabilidad	136
3.1.4.2.1. Clases de cada variable con mayor influencia en la susceptibilidad	138
3.1.4.2.2. Modelo de relación de frecuencias MOD1	140
3.1.4.2.3. Modelo de relación de frecuencias MOD2	140
3.1.4.2.4. Modelo de relación de frecuencias MOD5	141
3.1.4.2.5. Modelo de relación de frecuencias MOD7	141
3.1.4.3. Método De Números Difusos	142
3.1.4.3.1. Modelo γ : 0.75	148
3.1.4.3.2. Modelo γ : 0.90	148
3.1.4.3.3. Modelo γ : 0.95	149
3.1.4.3.4. Modelo γ : 0.975	149
3.1.4.3.5. Modelo γ : 0.99	150
3.1.4.4. Método de Redes Neuronales Artificiales	150
3.1.4.4.1. RNA1	152
3.1.4.4.2. RNA 2	152
3.1.4.4.3. RNA3	153
3.1.4.4.4. RNA4	153
3.1.4.4.5. RNA5	154
3.1.4.4.6. Media y Desviación Estándar	154
3.1.4.5. Pruebas de rendimiento	156
3.2. ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE MANIZALES	157
3.2.1. Inventario de deslizamientos	157
3.2.2. Factores de propensividad	157
3.2.2.1. Suelos / Geología	159
3.2.2.1.1. Geología	159
3.2.2.1.2. Geomorfología	161
3.2.2.1.3. Formaciones superficiales	161
3.2.2.1.4. Mapa de cobertura	162
3.2.2.2. Derivados de la topografía	162
3.2.2.2.1. Modelo digital de elevaciones	163
3.2.2.2.2. Pendiente	163
3.2.2.2.3. Pendiente transformada	164
3.2.2.2.4. Orientación de las laderas	164
3.2.2.2.5. Curvatura de la superficie	165
3.2.2.2.6. Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente	165
3.2.2.2.7. Curvatura en el sentido de la pendiente	166
3.2.2.2.8. Área de cuenca vertiente	166
3.2.2.2.9. Longitud de flujo	167
3.2.2.2.10. Insolación incidente en el terreno	167

3.2.2.2.11. Rugosidad	168
3.2.2.3. Distancia a elementos clave	168
3.2.2.3.1. Distancia a fallas y lineamientos	168
3.2.2.3.2. Distancia a vías y carreteras	169
3.2.2.3.3. Distancia a drenajes	169
3.2.2.3.4. Distancia a la red de acueducto	170
3.2.2.3.5. Distancia a la red de alcantarillado	170
3.2.2.3.6. Distancia a ríos	171
3.2.2.4. Socio-demográficos	171
3.2.2.4.1. Densidad de viviendas	171
3.2.2.4.2. Densidad poblacional bruta	172
3.2.2.4.3. Densidad poblacional neta	173
3.2.2.4.4. Viviendas en un radio de 50 m	173
3.2.2.4.5. Habitantes en un radio de 50 metros	174
3.2.2.4.6. Estrato socioeconómico	175
3.2.3. Muestra de análisis	175
3.2.4. Métodos de agregación	177
3.2.4.1. Función discriminante de susceptibilidad a deslizamientos	177
3.2.4.1.1. Análisis De Componentes Principales	183
3.2.4.2. Método De Funciones De Favorabilidad	185
3.2.4.3. Método De Números Difusos	189
3.2.4.4. Método de Redes Neuronales Artificiales	197
3.2.4.5. Pruebas de rendimiento	201
CAPITULO 4. UTILIZACIÓN DE LOS MODELOS	202
4.1. INTRODUCCIÓN	202
4.2. DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS DE SUSCEPTIBILIDAD PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL	204
4.3. ÁREAS DE PLANIFICACIÓN	205
4.4. INCORPORACIÓN DE ÁREAS CON TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS Y OBRAS DE MITIGACIÓN	208
4.5. RIESGO TÁCITO	210
4.6. ACCIONES DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL	213
4.7. INCLUSIÓN DEL FACTOR DETONANTE DE DESLIZAMIENTOS EN LOS ANÁLISIS	216
4.7.1. Umbrales intensidad-duración para sistemas de alerta temprana	217
4.7.2. Umbrales de lluvia antecedente al evento de deslizamiento	222
4.8. VALORACIÓN DE PÉRDIDAS	225
4.8.1. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos	225
4.8.2. Pérdidas esperadas	233
4.9. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA EL CONTROL DE DESLIZAMIENTOS URBANOS.	239
4.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS	244
4.10.1. Consideraciones Iniciales	244
4.10.1.1. Inventarios de deslizamiento:	244

4.10.1.2. Mapas topográficos.	244
4.10.2. <i>Parámetros de rendimiento general de los modelos</i>	246
4.10.3. <i>Análisis de ajuste de los modelos</i>	248
4.10.3.1. Área de estudio 1. Cuenca del río Chinchiná	248
4.10.3.1.1. Clasificación zonas inestables	248
4.10.3.1.2. Clasificación zonas estables	250
4.10.3.2. Área de estudio 2. Área Urbana de Manizales	251
4.10.3.2.1. Clasificación zonas inestables	252
4.10.3.2.2. Clasificación zonas estables	252
4.10.4. <i>Influencia individual de los factores de propensividad en los modelos</i>	254

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. TEORÍAS SOCIALES DEL RIESGO Y SU TAXONOMÍA.....	4
FIGURA 2. RELACIONES ENTRE DESASTRES Y DESARROLLO.....	10
FIGURA 3. ESTRATIFICACIÓN DEL RIESGO (ADAPTADO DE ISDR, 2010)	24
FIGURA 4. ESPECTRO DEL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTO	39
FIGURA 5. ESQUEMA PARA LA EVALUACIÓN ESPACIAL DE RIESGO POR DESLIZAMIENTO. CASTELLANOS-ABELLA (2008)	51
FIGURA 6. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LAS ÁREAS DE ESTUDIOS	69
FIGURA 7. POBLACIÓN DE MANIZALES ENTRE LOS AÑOS 1938 A 1993	72
FIGURA 8. ASPECTOS PLUVIOMÉTRICOS HISTÓRICOS DE LA CIUDAD	75
FIGURA 9. CONDICIONES CLIMÁTICAS HISTÓRICAS EN MANIZALES.....	76
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIONES (PROMEDIOS) EN EL AÑO	77
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIONES (MÁXIMOS) EN EL AÑO.....	77
FIGURA 12. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL CÁLCULO DE RIESGO POR DESLIZAMIENTO	81
FIGURA 13. ESQUEMA CONCEPTUAL PARA ELABORACIÓN DE MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD	81
FIGURA 14. FACTORES DE PROPENSIVIDAD Y SUS RELACIONES CON EL MARCO DE TRABAJO	84
FIGURA 15. CONVERSIÓN DE DATOS DE ALTITUD EN UN MODELO DIGITAL DE TERRENO	85
FIGURA 16. TRANSFORMACIÓN DE LA VARIABLE PENDIENTE.....	86
FIGURA 17. CURVATURA DE LA SUPERFICIE (FUENTE ESRI)	89
FIGURA 18. CURVATURA LONGITUDINAL DEL TERRENO	90
FIGURA 19. CURVATURA TRANSVERSAL DEL TERRENO	90
FIGURA 20. DIRECCIONES POSIBLES DE FLUJO EN EL PROGRAMA ArcView (IZQUIERDA) Y SUS DIRECCIONES GEOGRÁFICAS EQUIVALENTES (DERECHA)	91
FIGURA 21. CÁLCULO DE VARIABLES LONG Y PENDM	92
FIGURA 22. ÁREA UTILIZADA EN LOS CÁLCULOS DE PRESIÓN HABITACIONAL.....	94
FIGURA 23. ESQUEMA GENERAL DE UN MODELO DE RNA.....	104
FIGURA 24. PROCESO DE MODELIZACIÓN MEDIANTE RNAs.....	105
FIGURA 25. UMBRALES DE INTENSIDAD DURACIÓN PROPUESTOS PARA ITALIA (GUZZETTI, 2008).....	110
FIGURA 26. INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS PREVIOS EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ	111
FIGURA 27. MAPA DE COBERTURAS (RECLASIFICACIÓN A PARTIR DEL MAPA DE COBERTURAS SUMINISTRADO)	114
FIGURA 28. MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS (MATERIAL PARENTAL).....	114
FIGURA 29. MAPA DE PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS	115
FIGURA 30. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	115
FIGURA 31. PENDIENTE DEL TERRENO	116
FIGURA 32. PENDIENTE TRANSFORMADA DEL TERRENO	116
FIGURA 33. ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS	117
FIGURA 34. CURVATURA DEL TERRENO.....	117
FIGURA 35. CURVATURA TRANSVERSAL DEL TERRENO	118
FIGURA 36. CURVATURA LONGITUDINAL DEL TERRENO.	118

FIGURA 37. ÁREA DE CUENCA VERTIENTE.....	119
FIGURA 38. LONGITUD DE CUENCA VERTIENTE	119
FIGURA 39. INSOLACIÓN DEL TERRENO.....	120
FIGURA 40. DISTANCIA A FALLAS Y LINEAMIENTOS	120
FIGURA 41. DISTANCIA A VÍAS	121
FIGURA 42. DISTANCIA A CENTROS POBLADOS	121
FIGURA 43. DISTANCIA A RÍOS Y CAUCES.....	122
FIGURA 44. TEST DE IGUALDAD DE MEDIAS ENTRE GRUPOS (F DE FISHER)	125
FIGURA 45. TEST DE IGUALDAD DE MEDIAS ENTRE GRUPOS (LAMBDA DE WILKS)	125
FIGURA 46. SUSCEPTIBILIDAD MEDIANTE UNA FUNCIÓN DISCRIMINANTE	129
FIGURA 47. MODELO FUNCIÓN DISCRIMINANTE MOD2	130
FIGURA 48. MODELO FUNCIÓN DISCRIMINANTE MOD5	131
FIGURA 49. CURVAS DE RENDIMIENTO MODELOS DISCRIMINANTES.....	132
FIGURA 50. COMPONENTES PRINCIPALES	135
FIGURA 51. FRECUENCIA RELATIVA PARA EL ÁREA CON DESLIZAMIENTOS (GRIS CLARO), PARA EL ÁREA RESTANTE (GRIS OSCURO), Y RELACIÓN DE FRECUENCIAS PARA CADA CLASE DE CADA UNO DE LOS FACTORES (ROJO)	137
FIGURA 52. CURVAS DE RENDIMIENTO MODELOS DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS	139
FIGURA 53. MODELO DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS MOD1	140
FIGURA 54. MODELO DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS MOD2	140
FIGURA 55. MODELO DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS MOD5	141
FIGURA 56. MODELO DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS MOD7	141
FIGURA 57. FRECUENCIA RELATIVA ESCALADA F CORRESPONDIENTE A CADA VARIABLE Y NÚMERO DE PÍXELES TOTAL POR CADA CLASE ...	143
FIGURA 58. EJEMPLO DE UN NÚMERO DIFUSO (VARIABLE DEM)	144
FIGURA 59. INTERVALOS DE CONFIANZA EVALUADOS EN EL PUNTO CENTRAL $A(x)=1$ DE LOS NÚMEROS DIFUSOS ASOCIADOS A CADA UNO DE LOS FACTORES.....	146
FIGURA 60. CURVAS DE RENDIMIENTO MODELOS DE CONJUNTOS DIFUSOS	147
FIGURA 61. SUSCEPTIBILIDAD MODELO DE CONJUNTOS DIFUSOS Γ : 0.75	148
FIGURA 62. SUSCEPTIBILIDAD MODELO DE CONJUNTOS DIFUSOS Γ : 0.90	148
FIGURA 63. SUSCEPTIBILIDAD MODELO DE CONJUNTOS DIFUSOS Γ : 0.95	149
FIGURA 64. SUSCEPTIBILIDAD MODELO DE CONJUNTOS DIFUSOS Γ : 0.975	149
FIGURA 65. SUSCEPTIBILIDAD MODELO DE CONJUNTOS DIFUSOS Γ : 0.99	150
FIGURA 66. CURVAS DE RENDIMIENTO MODELOS DE CONJUNTOS DIFUSOS	151
FIGURA 67. MODELO RNA01.....	152
FIGURA 68. MODELO RNA02.....	152
FIGURA 69. MODELO RNA03.....	153
FIGURA 70. MODELO RNA04.....	153
FIGURA 71. MODELO RNA05.....	154
FIGURA 72. MODELO RNA PROMEDIO	155
FIGURA 73. DESVIACIÓN ESTÁNDAR MODELO RNA PROMEDIO	155

FIGURA 74. RENDIMIENTO GENERAL DE TODOS LOS MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD EVALUADOS	156
FIGURA 75. INVENTARIO DE EVENTOS PREVIOS	157
FIGURA 76. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	160
FIGURA 77. GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	161
FIGURA 78. FORMACIONES SUPERFICIALES	161
FIGURA 79. MAPA DE USOS DEL SUELO	162
FIGURA 80. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	163
FIGURA 81. PENDIENTE DEL TERRENO.....	163
FIGURA 82. PENDIENTE TRANSFORMADA DEL TERRENO	164
FIGURA 83. ORIENTACIÓN DEL TERRENO	164
FIGURA 84. CURVATURA DEL TERRENO.....	165
FIGURA 85. CONVEXIDAD/CONCAVIDAD TRANSVERSAL DEL TERRENO.....	165
FIGURA 86. CONVEXIDAD/CONCAVIDAD LONGITUDINAL DEL TERRENO	166
FIGURA 87. ÁREA DE CUENCA VERTIENTE.....	166
FIGURA 88. LONGITUD DE CUENCA VERTIENTE	167
FIGURA 89. INSOLACIÓN	167
FIGURA 90. RUGOSIDAD DEL TERRENO	168
FIGURA 91. DISTANCIA A FALLAS Y LINEAMIENTOS	168
FIGURA 92. DISTANCIA A LA MALLA VIAL.....	169
FIGURA 93. DISTANCIA A RÍOS Y QUEBRADAS.....	169
FIGURA 94. DISTANCIA A RED DE ACUEDUCTO	170
FIGURA 95. DISTANCIA A RED DE ALCANTARILLADO.....	170
FIGURA 96. DISTANCIA A RÍOS PRINCIPALES.....	171
FIGURA 97. DENSIDAD NETA DE VIVIENDAS	172
FIGURA 98. DENSIDAD POBLACIONAL BRUTA.....	172
FIGURA 99 DENSIDAD POBLACIONAL NETA.....	173
FIGURA 100. NÚMERO DE VIVIENDAS EN UN RADIO DE 50 METROS	174
FIGURA 101. HABITANTES EN UN RADIO DE 50 METROS.....	174
FIGURA 102. NIVEL SOCIOECONÓMICO DE LOS HABITANTES	175
FIGURA 103. MUESTRA DE ANÁLISIS.....	176
FIGURA 104. TEST F PARA EL MODELO POR ANÁLISIS DISCRIMINANTE.....	179
FIGURA 105. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR EL MÉTODO MULTIVARIADO DE ANÁLISIS DISCRIMINANTE.....	182
FIGURA 106. CURVAS DE RENDIMIENTO PARA MODELOS DISCRIMINANTES	183
FIGURA 107. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	184
FIGURA 108. FRECUENCIA RELATIVA PARA EL ÁREA CON DESLIZAMIENTOS (GRIS CLARO), PARA EL ÁREA RESTANTE (GRIS OSCURO), Y RELACIÓN DE FRECUENCIAS PARA CADA CLASE DE CADA UNO DE LOS FACTORES (ROJO)	187
FIGURA 109. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD MEDIANTE RELACIÓN DE FRECUENCIAS	188
FIGURA 110. CURVAS DE RENDIMIENTO PARA LOS MODELOS POR RELACIÓN DE FRECUENCIAS	189
FIGURA 111. FRECUENCIA RELATIVA ESCALADA F CORRESPONDIENTE A CADA VARIABLE Y NÚMERO DE PÍXELES TOTAL POR CADA CLASE .	192

FIGURA 112. INTERVALOS DE CONFIANZA EVALUADOS EN EL PUNTO CENTRAL $A(x)=1$ DE LOS NÚMEROS DIFUSOS ASOCIADOS A CADA UNO DE LOS FACTORES	195
FIGURA 113. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD MEDIANTE LA APLICACIÓN DE CONJUNTOS DIFUSOS	196
FIGURA 114. CURVAS DE RENDIMIENTO DE MODELOS POR CONJUNTOS DIFUSOS	197
FIGURA 115. DIFERENTES MODELOS DE RNA CALCULADOS.....	199
FIGURA 116. DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS MODELOS DE RNA.....	199
FIGURA 117. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR EL MÉTODO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES	200
FIGURA 118. CURVAS DE RENDIMIENTO DE MODELOS POR CONJUNTOS DIFUSOS.....	201
FIGURA 119. COMPARATIVA DE MÉTODOS DE MODELIZACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	201
FIGURA 120. ELEMENTOS BÁSICOS DEL MARCO DE GOBERNANZA DEL RIESGO SEGÚN INTERNATIONAL RISK GOVERNANCE COUNCIL. ADAPTADO DE IRGC (2007, p.6)	203
FIGURA 121. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD EN CONTORNOS.....	206
FIGURA 122. SUSCEPTIBILIDAD AGREGADA POR PREDIOS	207
FIGURA 123. MAPA DE ÁREAS DE TRATAMIENTO GEOTÉCNICO ATG	208
FIGURA 124. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE ÁREAS DE TRATAMIENTO GEOTÉCNICO A LOS MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD	210
FIGURA 125. RIESGO TÁCITO SECTOR NORTE	212
FIGURA 126. RIESGO TÁCITO SECTOR SUR	212
FIGURA 127. EVENTOS DE LLUVIA QUE GENERARON DESLIZAMIENTOS	218
FIGURA 128. ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA LAS DIFERENCIAS Δ	219
FIGURA 129. ESTIMACIÓN DE UMBRALES INTENSIDAD-DURACIÓN PARA LA CIUDAD DE MANIZALES	220
FIGURA 130. UMBRALES ID PROPUESTOS PARA MANIZALES	221
FIGURA 131. AGUACEROS DEL SEGUNDO PERÍODO LLUVIOSO DE 2013 QUE GENERARON DESLIZAMIENTOS	221
FIGURA 132. GRÁFICO DE LLUVIA ANTECEDENTE	223
FIGURA 133. PDF DE PRECIPITACIÓN ANTECEDENTE	224
FIGURA 134. PRECIPITACIÓN ANUAL MULTIANUAL PARA LA ZONA DE ESTUDIO	226
FIGURA 135. TASA ANUAL DE EXCEDENCIA (AMENAZA) DE DESLIZAMIENTOS PARA LA CIUDAD DE MANIZALES.....	227
FIGURA 136. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN 50 AÑOS.....	228
FIGURA 137. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN 100 AÑOS.....	229
FIGURA 138. MODELO DE EXPOSICIÓN EN TÉRMINOS MONETARIOS	231
FIGURA 139. MODELO DE EXPOSICIÓN DE HABITANTES	232
FIGURA 140. PÉRDIDAS ECONÓMICAS EN 50 AÑOS	235
FIGURA 141. PÉRDIDAS ECONÓMICAS EN 100 AÑOS	236
FIGURA 142. PÉRDIDAS HUMANAS EN 50 AÑOS	237
FIGURA 143. PÉRDIDAS HUMANAS EN 100 AÑOS	238
FIGURA 144. MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD ELABORADO CON LA TOPOGRAFÍA DE 2004.....	245
FIGURA 145. MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD ELABORADO CON LA TOPOGRAFÍA DE 2010.....	246
FIGURA 146. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE LOS MODELOS EVALUADOS EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ.....	247
FIGURA 147. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE LOS MODELOS EVALUADOS EN LA CIUDAD DE MANIZALES	248
FIGURA 148. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS INESTABLES, ÁREA DE ESTUDIO 1	249

FIGURA 149. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS INESTABLES POR CADA MÉTODO, ÁREA DE ESTUDIO 1	250
FIGURA 150. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS ESTABLES, ÁREA DE ESTUDIO 1.....	250
FIGURA 151. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS ESTABLES, POR CADA MÉTODO, ÁREA DE ESTUDIO 1.....	251
FIGURA 152. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS INESTABLES Y ESTABLES, POR CADA MÉTODO, ÁREA DE ESTUDIO 1.....	251
FIGURA 153. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS INESTABLES POR CADA MÉTODO, ÁREA DE ESTUDIO 2	252
FIGURA 154. FIGURA 155. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS ESTABLES, POR CADA MÉTODO, ÁREA DE ESTUDIO 2	253
FIGURA 156. CURVA ROC PARA CLASIFICACIÓN DE ZONAS INESTABLES Y ESTABLES, POR CADA MÉTODO, ÁREA DE ESTUDIO 2.....	254
FIGURA 157. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO REDES NEURONALES ÁREA DE ESTUDIO 1.....	254
FIGURA 158. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO DE REDES NEURONALES ÁREA DE ESTUDIO 2.....	255

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. ENFOQUES SOCIALES DEL RIESGO	3
TABLA 2. LEGISLACIÓN EN EL TEMA DE RIESGOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN COLOMBIA	29
TABLA 3. DEFINICIONES PARA EVALUACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO (VARNES Y IAEG, 1984)	36
TABLA 4. DEFINICIONES PARA GESTIÓN DE RIESGO POR DESLIZAMIENTO (IUGS, 1997)	37
TABLA 5. TIPOS DE ZONIFICACIÓN POSIBLE PARA PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	41
TABLA 6. DIVERSOS TIPOS DE MAPAS POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	43
TABLA 7. DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ANÁLISIS	45
TABLA 8. MÉTODOS BASADOS EN PRINCIPIOS FÍSICOS (COROMINAS ET AL, 2014)	46
TABLA 9. MÉTODOS RECOMENDADOS PARA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DE TIPO DATA-DRIVEN (COROMINAS ET AL, 2014).....	48
TABLA 3. POSICIÓN DEL SOL PARA LOS CÁLCULOS DE INSOLACIÓN	87
TABLA 11. ESTADÍSTICOS DE RENDIMIENTO COMÚNMENTE UTILIZADOS (COROMINAS ET. AL. 2014).....	107
TABLA 12. FACTORES CAUSALES DE DESLIZAMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ	113
TABLA 13. MATRIZ DE CORRELACIONES	123
TABLA 14. VARIABLES CON CORRELACIONES ALTAS	124
TABLA 15. TEST DE IGUALDAD DE MEDIA ENTRE GRUPOS	124
TABLA 16. CORRELACIÓN DE COVARIANZAS.....	125
TABLA 17. CHEQUEO DE HOMOGENEIDAD DE COVARIANZAS.....	126
TABLA 18. TEST BOX M	126
TABLA 19. LAMBDA DE WILKS PARA EL MODELO GENERAL	126
TABLA 20. VALORES PROPIOS Y CORRELACIÓN PARA LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE	127
TABLA 21. MATRIZ DE ESTRUCTURA DEL MODELO	127
TABLA 22. COEFICIENTES CANÓNICOS ESTANDARIZADOS.....	127
TABLA 23. COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE	128
TABLA 24. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DEL MODELO INICIAL	128
TABLA 25. DIFERENTES MODELOS DE FUNCIÓN DISCRIMINANTE PROBADOS	130
TABLA 26. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO MODELOS DISCRIMINANTES	132
TABLA 27. VARIANZA EXPLICADA POR LOS COMPONENTES PRINCIPALES	133
TABLA 28. COMUNALIDADES PARA LAS VARIABLES.....	133
TABLA 29. TEST KMO Y DE BARTLETT.....	133
TABLA 30. MATRIZ DE COMPONENTES PRINCIPALES	134
TABLA 31. CLASE DE CADA VARIABLE MÁS INFLUYENTE	138
TABLA 32. DIFERENTES MODELOS DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS PROBADOS	138
TABLA 33. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO MODELOS DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS	139
TABLA 34. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO MODELOS DE CONJUNTOS DIFUSOS	147

TABLA 35. DISTRIBUCIÓN DE DATOS EN GRUPOS PARA CONFIGURAR CINCO MODELOS DE RNA	150
TABLA 36. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO MODELOS DE REDES NEURONALES	151
TABLA 37. FACTORES DE PROPENSIVIDAD A LA INESTABILIDAD DE LADERAS EN LA CIUDAD DE MANIZALES	157
TABLA 38. . ASIGNACIÓN DE PESO A SECTORES GEOLÓGICOS DE MANIZALES	159
TABLA 39. ASIGNACIÓN DE PESO A USOS DEL SUELO EN MANIZALES	162
TABLA 40. MUESTRA DE ANÁLISIS PARA ELABORACIÓN DE MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD	177
TABLA 41. MATRIZ DE CORRELACIONES	177
TABLA 42. VARIABLES CON CORRELACIONES ALTAS	178
TABLA 43. TEST DE IGUALDAD DE MEDIAS ENTRE GRUPOS	178
TABLA 44. CORRELACIÓN DE COVARIANZAS	179
TABLA 45. CHEQUEO DE HOMOGENEIDAD DE COVARIANZAS	179
TABLA 46. TEST BOX M	180
TABLA 47. LAMBDA DE WILKS PARA EL MODELO GENERAL	180
TABLA 48. VALORES PROPIOS Y CORRELACIÓN PARA LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE	180
TABLA 49. MATRIZ DE ESTRUCTURA DEL MODELO	181
TABLA 50. COEFICIENTES CANÓNICOS ESTANDARIZADOS	181
TABLA 51. COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE	181
TABLA 52. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DEL MODELO INICIAL	182
TABLA 53. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE LOS MODELOS PROBADOS	183
TABLA 54. VARIANZA EXPLICADA POR LOS COMPONENTES PRINCIPALES	184
TABLA 55. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO MODELOS DE RELACIÓN DE FRECUENCIAS	188
TABLA 56. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE MODELOS POR CONJUNTOS DIFUSOS	196
TABLA 57. DISTRIBUCIÓN DE LA DB PARA ELABORACIÓN DE MODELOS DE RNA	197
TABLA 58. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE MODELOS POR REDES NEURONALES	200
TABLA 59. VALORACIÓN DE PROBABILIDADES RELATIVAS SEGÚN (IPCC 2013, p.36)	204
TABLA 60. CRITERIOS PARA CATEGORIZAR LA SUSCEPTIBILIDAD	205
TABLA 61. TIPOS DE OBRAS DE MITIGACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	209
TABLA 62. NIVELES DE AMENAZA RELATIVA Y RIESGO IMPLÍCITO PARA EL CASO DE INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS	211
TABLA 63. TIPOS DE INTERVENCIONES ASOCIADAS A NIVELES DE RIESGO IMPLÍCITO	214
TABLA 64. USOS DEL SUELO PERMITIDOS POR TIPO DE RIESGO IMPLÍCITO	215
TABLA 65. VALORES MEDIOS DE PRECIPITACIÓN ESTACIÓN POSTGRADOS.	222
TABLA 66. PARÁMETROS DE LA PDF PARA VARIOS PERÍODOS DE LLUVIA ANTECEDENTE	225
TABLA 67. DENSIDADES DE URBANIZACIÓN SUGERIDAS PARA ÁREAS PROPENSAS A DESLIZAMIENTOS	243
TABLA 68. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO PARA LOS DIFERENTES MODELOS EVALUADOS EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ	247
TABLA 69. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO PARA LOS DIFERENTES MODELOS EVALUADOS EN LA CIUDAD DE MANIZALES	247
TABLA 70. . VALORES DE ÁREA BAJO LA CURVA DE CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS	249

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Riesgo y Desastres

El concepto de riesgo se ha convertido en tópico de múltiples disciplinas. Algunas áreas en las cuales ha tomado especial relevancia son el campo de amenazas naturales, peligros tecnológicos, condiciones de trabajo, impactos a la salud, crimen, terrorismo y polución. En general, se usan diferentes enfoques conceptuales basados en diversas concepciones disciplinares. Riesgo significa algo particular en cada disciplina como las ciencias naturales, ingeniería, psicología, ciencias sociales y culturales.

No obstante, todos los conceptos de riesgo tienen una condición previa: la contingencia de las acciones humanas. En cualquier momento, un individuo, organización o sociedad, enfrentan varias opciones de acción (incluyendo no hacer nada), cada una de las cuales está asociada con consecuencias potenciales positivas o negativas. Pensar en términos de riesgo ayuda a encontrar la opción que genera comparativamente más beneficios que daños. (Renn: 2008).

La definición original de Kates et al. (1985) sobre riesgo denota la posibilidad de que se presenten efectos adversos como resultado de eventos naturales o acciones humanas. Esta definición general implica la existencia de conexiones causales entre acciones o eventos. Las consecuencias pueden modificarse de dos maneras: modificando la actividad o evento iniciador, o bien, mitigando los impactos. De esta manera, hay tres elementos principales en la definición de riesgo: consecuencias, con un impacto, probabilidad de ocurrencia (incertidumbre), y un contexto específico en el cual se puede materializar el riesgo.

A continuación se describen brevemente las características principales de cada enfoque conceptual del riesgo, de acuerdo con las definiciones más aceptadas desde cada disciplina.

1.1.1. Ciencias naturales y técnicas

Los enfoques desde las ciencias naturales buscan anticipar los potenciales de pérdidas sobre los seres humanos, bienes culturales, o ecosistemas, promediando los eventos temporal y espacialmente, mediante el uso de frecuencias relativas o estimadas (observadas o modeladas), haciendo énfasis en el daño físico. Las implicaciones de tipo instrumental sobre la sociedad de estos enfoques son las regulaciones, transferencia del riesgo, y reducción del riesgo. Existen tres enfoques en este campo, ampliamente utilizados hoy en día.

Un enfoque actuarial, que aborda de manera simple pero efectiva la problemática del riesgo, tomando como referencia el valor esperado. Los efectos adversos se analizan mediante modelos científicos, con mediciones de carácter técnico. El resultado se reduce a una dimensión que representa la probabilidad estimada en términos de tiempo, espacio y contexto.

Los Modelos causales de riesgo, que abordan casos más complejos, donde la conexión entre exposición y efectos adversos no es tan directa, como en el caso de fenómenos ambientales, en los cuales las relaciones causales deben ser exploradas mediante modelización.

Otro campo técnico de análisis es el de riesgo probabilista, en el cual, mediante modelos distribuidos basados en la Teoría de la Probabilidad, y aplicados mediante Sistemas de Información Geográfica SIG, técnicas de escenarios y simulaciones, se caracteriza el riesgo. Estas técnicas especifican qué está en juego, calculan las probabilidades de consecuencias y agregan los resultados en una función de probabilidad de pérdida y una serie de curvas que dan cuenta en términos numéricos de las posibilidades de afectación.

1.1.2. Perspectiva económica

La mayor particularidad en este enfoque es la transformación del daño físico o de otros efectos indeseables en lo que los economistas llaman “utilidades”. La unidad de medida de utilidad describe el grado de satisfacción o insatisfacción que se obtiene con una posible acción. Esta modificación conceptual surte dos efectos: uno subjetivo en el que la satisfacción puede medirse mediante las consecuencias, incluidas las simbólicas, psicológicas o sociales. Segundo, y más importante, usando la utilidad en lugar del daño físico se genera una rata de cambio que permite a cada individuo comparar opciones con perfiles de beneficios de acuerdo a la satisfacción promedio.

La pregunta clásica en el tema sobre cuánta seguridad es una seguridad suficiente, no puede contestarse con argumentos desde el campo netamente técnico, pero desde lo económico se observan dos vías: el riesgo es aceptable en función de la relación beneficio costo, o en caso de opciones concretas, permite seleccionar la opción que represente el mínimo riesgo con los mayores beneficios.

1.1.3. La psicología de la percepción del riesgo

Este enfoque expande el campo de juicio subjetivo sobre la naturaleza y magnitud del riesgo en tres vías.

Primero, se enfoca en preferencias personales para explicar por qué los individuos no basan sus juicios en valores esperados; las personas tienen aversión al riesgo cuando deben enfrentar pérdidas potenciales, pero son propensos al riesgo, cuando pueden obtener beneficios (aun cuando éstos sean mínimos).

Segundo, estudios específicos en percepción de riesgo en la toma de decisiones muestran sesgos en la percepción de información probabilista por parte de la gente, para hacer inferencias, lo cual tiende a subestimar ciertas amenazas, por ejemplo, de tipo natural, y sobrevalorar otras, por ejemplo, de tipo tecnológico. La percepción del riesgo también difiere ampliamente entre grupos sociales y culturales.

El principal aporte de esta perspectiva es que se enriquece la visión del riesgo con variables de contexto como el grado de control percibido, la percepción de riesgo grupal más que individual, o la familiaridad con situaciones de riesgo. El énfasis subjetivo también constituye la mayor debilidad del enfoque psicológico, que hace difícil encontrar un común denominador para la percepción del riesgo, si bien la información generada contribuye notablemente a entender el riesgo y diseñar políticas, considerando el contexto.

1.1.4. Conceptos desde lo social y cultural

Esta perspectiva incluye eventos indeseables socialmente definidos, y en algunos casos, socialmente contruidos. Las consecuencias reales siempre están mediadas por la interpretación social, conectada con valores e intereses de grupos. Todos los enfoques sociológicos y antropológicos tienen en común la noción de que los humanos no perciben el mundo de igual manera, sino a través de percepciones determinadas por significados culturales y sociales, transmitidos por influencias primarias como la familia, amigos, subordinados.

Principalmente se tienen seis enfoques teóricos comúnmente aceptados (Renn 2008). La elección racional, la modernización reflexiva, la teoría de sistemas, la teoría crítica, la perspectiva postmoderna, y la teoría cultural, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Enfoques sociales del riesgo

Corriente	Autores relevantes	Definición
Elección racional	Jaegger et al. 2001	Los seres humanos pueden actuar de manera estratégica, conectando decisiones con resultados
Modernización reflexiva o "Sociedad del Riesgo"	Beck, 1986; Guiddens, 2000	La meta-racionalidad de la modernidad ha perdido su poder legitimador
Teoría de sistemas	Luhmann, 1993	El riesgo es un constructo social conectado con interrelaciones de subsistemas
Teoría crítica	Habermas 1984, 1987.	Riesgo es visto como un fenómeno real, causado por fuerzas estructurales como los sistemas capitalistas
Perspectiva postmoderna	Foucault, 1982. Dean, 1999.	Es una forma extrema de constructivismo. Lo que es visto como beneficio o riesgo y su grado, depende de fuerzas sociales. De esta manera, el riesgo es un elemento más para legitimar el poder.
Teoría cultural	Douglas, 1966. Douglas and Wildavsky, 1982. Adams, 1995. Lupton and Tulloch, 2002.	El riesgo es un constructo social determinado por fuerzas estructurales en la sociedad.

En cuanto a una posible taxonomía, la Figura 1 ordena los enfoques sociológicos y antropológicos en dos dimensiones: individualismo vs estructuralismo y realismo vs constructivismo, siguiendo los estudios de Renn (2008A).

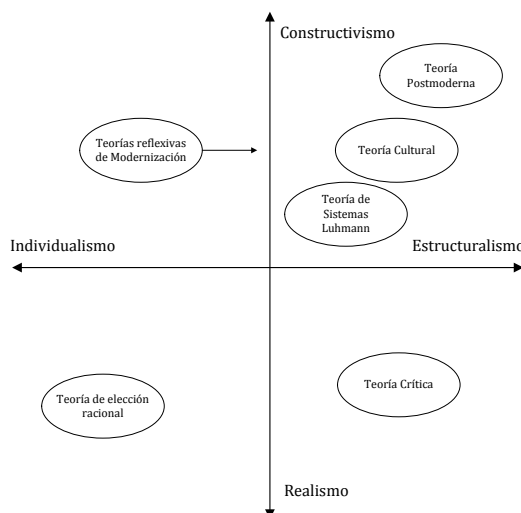


Figura 1. Teorías sociales del riesgo y su taxonomía

Las concepciones sociales de riesgo tienen en común que la definición de consecuencias deseables o indeseables, la generación o estimación de posibilidades de combinarlas, depende de preferencias individuales, variables de contexto social y la afiliación del respectivo grupo social.

1.1.5. Comentarios sobre los diferentes enfoques

Los enfoques de las ciencias naturales y técnicas han tenido críticos. En primer lugar, lo que la gente percibe como efecto indeseable depende de sus valores y preferencias. Segundo, las interacciones entre actividades humanas y consecuencias son más complejas, globales y únicas que las probabilidades promedio que pueden capturarse mediante análisis técnicos de riesgo (Fischhoff et al. 1982; Zinn and Taylor-Gooby 2006). Tercero, la estructura institucional de gestión y control de riesgos es propensa a fallos organizacionales y déficits que pueden incrementar los riesgos actuales (Perrow 1999; Short 1984; Short and Clarke 1992); esta interacción normalmente no se considera en estudios técnicos de riesgo. Cuarto, los análisis de riesgo no pueden considerarse como una actividad científica ajena a valores (Fischhoff 1995); los valores son reflejados en la forma de caracterizar el riesgo, medirlo e interpretarlo. Quinto, la amplia combinación numérica de magnitudes y probabilidades asume igual peso para ambos componentes, lo cual implica indiferencia entre eventos de altas consecuencias/baja probabilidad y eventos de bajas consecuencias/alta probabilidad con idénticos valores esperados. De igual manera, los análisis técnicos de riesgo proveen datos agregados sobre grandes segmentos de la población y largos períodos de duración. Cada individuo, de esta manera, puede enfrentar grados de riesgo diferentes, basado en la varianza de la distribución de probabilidad. Una persona expuesta a un riesgo mayor al promedio, podría legítimamente objetar una política basada en estos cálculos agregados. La manera en que una persona está expuesta a riesgos específicos también tiene que ver con factores

de estilo de vida y circunstancias individuales, las cuales son desconocidas generalmente por quienes hacen análisis de riesgos.

Con el énfasis en los efectos reales sobre la salud, pérdidas económicas o daño ecológico, estos conceptos se basan en un consenso sobre lo que son “efectos no deseados” y una metodología de tipo positivista que da igual tratamiento a todos los tipos de riesgo bajo consideración. El precio que debe pagar la sociedad por este rigor metodológico es la abstracción de la parte cultural y el contexto.

Mirando las limitaciones y ventajas de los análisis técnicos, es obvio que se debe seguir mejorando las metodologías para evaluación de riesgos. Los principales objetivos son la estandarización de procedimientos y técnicas para aumentar el espectro de eventos que pueden modelarse, y para asegurar que los gestores de riesgo puedan entender y utilizar ampliamente los instrumentos que el análisis de riesgo ha desarrollado durante las últimas décadas. Los análisis técnicos de riesgo han madurado para convertirse en sofisticadas herramientas para hacer frente a los potenciales de daño causados por acciones humanas y desastres.

Por su parte, las perspectivas desde lo económico psicológico, y ciencias sociales, expanden los horizontes de las consecuencias del riesgo, reconociendo realidades socialmente construidas o socialmente mediadas. Esta forma de ver el tema lleva a hacer énfasis además de la percepción de las consecuencias, en la evaluación del contexto, los impactos no físicos y las asociaciones entre riesgo y “artefactos” sociales y culturales. La sociedad está experimentando un incremento en pluralismo de valores, estilos de vida y sistemas de conocimientos (Beck, 1986), y es innegable que el contexto tiene alta importancia.

Otra forma de ver las distintas posturas es en términos de objetividad y subjetividad. Mientras el enfoque objetivo que quieren proponer las “ciencias duras” suele carecer de la dimensión social, que es de importancia cuando se evalúan desastres, las definiciones subjetivas, propias de las disciplinas sociales, son igualmente insatisfactorias, pues implican que el riesgo tiene únicamente una interpretación personal a medida de cada situación. Este escenario es inoperante cuando se trata de intervención de riesgo desde el punto de vista de la política pública, razón por la cual es necesario tener un lenguaje común y una teoría holística desde la interdisciplina (Cardona, 2004).

Lo que es necesario es un enfoque integral del concepto de riesgo, que expanda las diferentes perspectivas y ofrezca una visión integrada para capturar los aspectos físicos del riesgo, pero también los socio-culturales. Este tipo de integración debe estar guiada por el rigor y especificidad de las ciencias técnicas y naturales, y enriquecido por la pluralidad de la economía, psicología y enfoques desde las ciencias sociales (Renn, 2008a).

1.1.6. Definición de Riesgo desde la perspectiva de los desastres

Riesgo significa la posibilidad de futuros desastres. El término riesgo de desastre sugiere que existe una posibilidad de que un fenómeno peligroso o evento ocurra y que haya elementos expuestos susceptibles a ser afectados. La reducción de riesgo, bajo esta perspectiva, significa la reducción de la posibilidad de futuros desastres. Así que, desastre es un contexto social o proceso detonado por un fenómeno natural, tecnológico o antrópico, que en interacción con un medio susceptible, causa alteraciones intensas en el normal funcionamiento de la comunidad. Estas alteraciones pueden expresarse entre otras formas, en pérdida de vidas, serios problemas de salud, daño o destrucción de bienes individuales o colectivos, o daño severo al ambiente. Por esta razón se requieren respuestas rápidas para restaurar el bienestar de las personas o ecosistemas afectados y restablecer adecuados niveles de normalidad.

La ocurrencia de desastres requiere la previa existencia de determinadas condiciones de riesgo. En otros términos, el desastre es la materialización del riesgo preexistente. Las definiciones y conceptos pueden ocultar muchos aspectos diferentes con amplias variaciones según la disciplina científica, ideología y punto de vista ontológico desde el cual se hagan los planteamientos.

Las diferentes formulaciones del problema utilizan las ideas iniciales de la escuela de ecología humana de pensamiento, propuestas por geógrafos de la Universidad de Chicago durante la segunda década del siglo XX y desarrolladas posteriormente por White (1945, 1964, 1973), Kates (1971, 1978) en sus estudios de amenazas y desastres. De otra parte, la consideración de la frecuencia de los eventos amenazantes y su severidad en cuanto a consecuencias ha sido tradicionalmente campo de estudio del aspecto técnico.

A partir de estas ideas, la Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator (UNDRO) y la UNESCO organizaron una reunión de expertos en julio de 1979 con el objetivo de unificar definiciones relacionadas con desastres. El reporte surgido de este encuentro, Natural Disasters and Vulnerability Analysis (UNDRO, 1980), incluye las definiciones de amenaza natural (H), vulnerabilidad (V), elementos en riesgo (E), riesgo específico (S) y riesgo (R). Desde este punto de vista, riesgo puede definirse como

$$R = E \cdot S = E \cdot H \cdot V$$

Dado que $S=H \cdot V$

La consideración de la exposición como parte del concepto de vulnerabilidad, y por tanto, la sugerencia de su supresión de la formulación general, fue propuesta en sucesivas formulaciones, como la presentada por Fournier d'Albe (1985) y posteriormente por Coburn and Spence (1992). La expresión de riesgo como función de la amenaza y vulnerabilidad, ahora ampliamente aceptada en los campos técnicos y científicos y cada vez más en los campos social y ambiental, fue reformulada:

$$R_{ie}|_t = f(H_i, V_e)|_t$$

Conocida la amenaza (H) expresada como la probabilidad que un evento con una intensidad igual o mayor a i ocurra durante un periodo de exposición t , y la vulnerabilidad (V_e) entendida como la predisposición intrínseca de un elemento e a ser afectado o susceptible al daño con la ocurrencia de un evento de intensidad i , el riesgo R_{ie} , es expresado como la probabilidad de pérdida del elemento como resultado de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a i .

Si C_p expresa la crisis potencial, T_a representa la posibilidad de ocurrencia de un evento detonante, e I_c son las condiciones de inestabilidad del sistema, desde la perspectiva de los sistemas complejos, es posible proponer el siguiente concepto:

$$C_p|_t = f(T_a, I_c)|_t$$

Esta expresión es más general y contiene la ecuación de riesgo, que es un caso particular de comportamiento de un sistema dinámico no lineal específico, al borde del caos, en el cual es importante considerar la perturbación del agente detonante (amenaza), pero también las condiciones dinámicas de inestabilidad (vulnerabilidad) (Cardona 1995, 1999, 2001). La posibilidad de que surja una crisis debe considerarse en un lapso o ventana de tiempo, lo cual implica expresar cada factor en términos de probabilidad.

1.2. Desastres y desarrollo

Los desastres naturales ocurren alrededor del mundo. No obstante, su impacto es mayor en países en vías de desarrollo, donde su frecuencia es alta. En muchos casos, la ocurrencia de desastres naturales se debe a dos factores principales: Primero, existe una relación entre la localización geográfica y las características geológicas y geomorfológicas, pues los países en vías de desarrollo, están localizados en zonas afectadas por actividad volcánica, sismicidad e inundaciones. La segunda razón está conectada al desarrollo histórico de esos países, donde las condiciones económicas, sociales, políticas y culturales no son buenas y consecuentemente actúan como factores de incremento de vulnerabilidad a desastres naturales (vulnerabilidad económica, social, política y cultural). (Alcantara-Ayala, 2002).

En la década de 1960s se introdujo la idea de devastación causada por desastres naturales como resultado de las características sociales y económicas de regiones donde tenían lugar (White, 1964; Kates, 1962). Fue hacia 1970 cuando se aceptó el rol de las condiciones económicas y sociales como factores de vulnerabilidad frente desastres naturales.

El interés de entender además del evento natural per se, las características de riesgo en las áreas propensas al fenómeno, orientó la atención de científicos sociales hacia el estudio del riesgo y vulnerabilidad (e.g., Albala-Bertrand, 1993; Blaikie et al., 1996; Cannon, 1993; Winchester, 1992). De esta manera, mediante el análisis de experiencias, fue cada vez más aceptado que existe una relación entre los desastres ocurridos y los modelos de desarrollo de las áreas afectadas. Como lo dice UNDP (2004), es importante recordar que un colegio o centro de salud destruido durante un terremoto, fue alguna vez un proyecto de desarrollo financiado por recursos nacionales, o bien por ayudas externas de cooperación para el desarrollo.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo UNDP (2004), resaltaba que solo el 11% de la gente expuesta a amenazas vive en países con bajo desarrollo humano, pero el 53% de la mortalidad por desastres está concentrada en esos países que tienen bajos ingresos, baja esperanza de vida y bajos niveles educativos. Otro estudio del UNDP (2007) anotó que el riesgo de desastres es considerablemente más alto en países en desarrollo. La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR) de las Naciones Unidas (ISDR, 2009) sugirió también que los países con bajos ingresos (low-income) representan el 13% de la exposición pero aportan por lo menos el 81% del riesgo de mortalidad.

En la misma línea de su título “Reducing disaster risk. A Challenge for Development”, el reporte del UNDP (2004) refuerza la realidad de que las amenazas naturales – terremotos, sequías, inundaciones y tormentas – se transforman en desastres (“innaturales”) en la forma de muerte, heridos y daño, debido únicamente a acciones humanas de omisión o comisión. Se hace eco de la contribución de O’Keefe, Westgate and Wisner a Nature hace unos 35 años. O’Keefe et al. (1976)

argumentaron que los desastres fueron una consecuencia más de factores socioeconómicos que naturales y han provocado un cambio de paradigma desde la idea de “desastres naturales” a la visión de la “construcción social” de los desastres (ver también Cannon, 1993).

Durante el período 1980-2012 las pérdidas totales estimadas, debidas a desastres, alcanzaron un monto de 3.8 trillones de dólares. Los desastres tienden a sumir a las personas en la pobreza y arrojarlos a un bucle; hogares pobres y marginalizados tienden a ser menos resilientes y a enfrentar grandes dificultades para absorber y recuperarse del impacto de un desastre (UNDP, 2004). En este contexto la resiliencia puede entenderse como la habilidad de las sociedades para resistir, enfrentarse y recuperarse de un shock. De esta manera, el riesgo puede reducirse mediante el reforzamiento de la resiliencia.

Múltiples estudios detallados sugieren que el gran driver del riesgo de desastres en años recientes ha sido el sustancial crecimiento de población y de activos en áreas en riesgo. La migración a áreas costeras y la expansión de ciudades en llanuras de inundación, junto a inapropiados estándares de construcción, están entre las principales razones del incremento. Los desastres hidrometeorológicos, por ejemplo, aportan el 74% (2.6 trillones) del total de pérdidas reportadas, 78% (18.200) del total de desastres y 61% (1.4 millones) del total de víctimas.

Pocos países tienen las herramientas, experticia y mecanismos para considerar el impacto potencial del riesgo en sus decisiones de inversión. Es poco común contabilizar pérdidas, recolectar datos, y evaluar el riesgo sistemáticamente y de manera prospectiva. Como resultado, no es posible direccionar los recursos necesarios para proteger las inversiones y reducir la exposición a futuros impactos y no se dispone opciones de priorización de esos recursos, al no conocer el riesgo o amenaza asociada a cada porción del territorio. Esta situación se repite a escalas regionales y municipales.

Por mucho tiempo la relación causa efecto entre desastres y desarrollo económico y social fue ignorada. Los ministros de planificación y hacienda y planificadores en general, no veían relación entre sus competencias y los desastres. Cuanto mucho, los planificadores esperaban que los desastres no ocurrieran, y si lo hacían, que fueran gestionados eficientemente por entidades de socorro de países donantes u organizaciones internacionales. Los programas de desarrollo no fueron evaluados en el contexto de los desastres; no se consideraba que el desastre pudiera tener efecto en el programa de desarrollo o la posibilidad de que el programa de desarrollo incrementara la probabilidad del desastre o los efectos potenciales del mismo.

De manera incremental, hay un temor de que los desastres resultan de problemas no resueltos del desarrollo como la degradación ambiental, el incontrolado crecimiento urbano, el mal funcionamiento del mercado de la tierra y la vivienda, exacerbado por el crecimiento poblacional y el vacío político e institucional. Los desastres fueron vistos en el contexto de la atención de

emergencias puntuales y no como producto de un programa a largo plazo de planificación al desarrollo.

Los desastres, la pérdida de infraestructura, producción y vidas humanas, están relacionados, en general, con los niveles preexistentes de riesgo. El tipo, estructura y nivel de vulnerabilidad establecido, pre-condicionan el daño que puede ser causado por un evento físico particular (Blaikie et al 1996; Hewitt, 1997). Esta vulnerabilidad es el resultado de procesos sociales, que a su vez son consecuencias o componentes de los distintos estilos o modelos de crecimiento y cambio social adoptados o impuestos en diferentes países. En este punto, es posible suponer, por ejemplo, que diferentes modelos de crecimiento se asocian con diferentes consecuencias y expresiones de riesgo y de vulnerabilidad. Alguna expresión de riesgo y vulnerabilidad es inherente a, o estructuralmente determinada por los tipos de proceso social que tipifican estos diferentes modelos (Lavell, 2000).

El marco de conocimiento de la relación entre desastre y desarrollo indica cuatro temas principales como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Relaciones entre desastres y desarrollo

Se dibujan aspectos relacionados con el desarrollo y la vulnerabilidad frente a amenazas. Del gráfico se desprenden varias orientaciones entre las formas de desarrollo y la vulnerabilidad. Pueden suponerse aspectos positivos y negativos de la relación desastres-desarrollo en el eje vertical y posturas negativas (pesimistas) y positivas (optimistas) de la relación en el eje horizontal.

Describiendo lo que ocurre en cada cuadrante se tiene:

1. Los desastres pueden interrumpir y retrasar programas de desarrollo, destruyendo años de iniciativas de desarrollo. Por ejemplo la destrucción de infraestructuras.

2. Los procesos de reconstrucción post-desastre proveen oportunidades para iniciar programas de desarrollo, por ejemplo mediante programas de construcción de viviendas destruidas.

3. Los programas de desarrollo pueden incrementar la vulnerabilidad.

4. Los programas de desarrollo pueden diseñarse para reducir la vulnerabilidad a desastres y sus impactos negativos. Por ejemplo, códigos de construcción en el caso sísmico.

En el tiempo, los efectos de los desastres pueden degradar el potencial a largo plazo de los países para el desarrollo sostenible y causar que los gobiernos modifiquen sustancialmente sus prioridades y programas de desarrollo económico.

De igual manera, los desastres a menudo proveen oportunidades para el desarrollo. Puede propiciarse una atmósfera a favor del cambio o creación de programas racionales de desarrollo como entrenamiento, construcción de casas y reforma de la tierra. Un enfoque incorrecto de la ayuda puede tener implicaciones negativas en el desarrollo por años, en el sentido en que puede incrementar la vulnerabilidad.

Es importante considerar el potencial, riesgos y consecuencias de los desastres como parte de un programa de planificación al desarrollo en el cual se enfaticen las oportunidades para prevenir y mitigar el daño y el impacto.

1.2.1. Riesgos como problemas no resueltos del desarrollo

Aceptando que el riesgo es un proceso caracterizado por tener cierto período de incubación y no por ser un suceso súbito, Mansilla (2000) desarrolla un análisis de los factores que han llevado, a lo largo de la historia a la configuración de escenarios dispares de riesgos, desentrañando de las relaciones hombre-naturaleza algunos factores incubadores de riesgo. A partir de la idea de la satisfacción de necesidades básicas que siempre ha guiado las actuaciones humanas, Marx (1884) entendía la relación hombre-naturaleza como la satisfacción de las necesidades materiales del hombre (proceso productivo) y la adaptación de las comunidades en el territorio (espacios de habitación), siendo el primer factor esencial y determinante sobre la conformación de asentamientos. Surge así la necesidad de “socializar” la naturaleza; es decir, de transformarla y adaptarla para satisfacer las propias necesidades, y es desde este punto donde empiezan a emerger los elementos constitutivos del riesgo (Mansilla, 2000).

En la sociedad primitiva esta relación se fundamentaba en el respeto y protección de los recursos naturales; existía equilibrio entre la explotación de la naturaleza y la satisfacción de las necesidades, seguramente condicionado por el precario desarrollo de las fuerzas productivas más que por una conciencia ecológica. Al desarrollarse las fuerzas productivas y mutar los modos de organización social, cambia el factor dominante de la relación, y se pasa de la simple satisfacción de

las necesidades a la generación y apropiación privada del excedente, lo cual es favorecido por el desarrollo tecnológico que permite explotación más intensiva y torna difícil la recuperación de ecosistemas. A partir de este punto se inicia un proceso de degradación de la naturaleza, aumenta la complejidad de la vulnerabilidad, y la amenaza toma un carácter más social (origen socio natural, antrópico y tecnológico) que natural. A partir de este punto, la construcción del riesgo se convierte en un proceso inherente al desarrollo de la sociedad.

Varios estudios consideran el acelerado crecimiento de la población, y en consecuencia, la creciente demanda de satisfactores, como uno de los factores clave para entender los cambios en los procesos naturales. A nivel mundial, en 1900 existían 1700 millones de habitantes y en 1995, 5900 millones, lo cual induce la necesidad de producir más cantidad de satisfactores. En otros términos, se establece una relación directa entre el crecimiento de la población y la injerencia del hombre sobre los procesos naturales, y por tanto su transformación. No obstante, esta hipótesis no es suficiente para explicar las transformaciones de la naturaleza y la degradación actual. Es con el surgimiento de las sociedades mercantiles y en particular la sociedad mercantil capitalista, que se gestan las condiciones para la aparición del riesgo incontrolado que caracteriza la sociedad contemporánea (Mansilla, 2000).

Por otro lado, la propiedad privada y la distribución privada de beneficios, propician el surgimiento de clases sociales, junto a la desigualdad social por concentración de ingresos, y a la ampliación de las franjas de pobreza y pobreza extrema entre la población, y obligan a sectores de la sociedad a adoptar formas autónomas de reproducción material. Otro factor que contribuye a la construcción del riesgo, particularmente en países en vías de desarrollo, es la iniciativa individual o colectiva que establece sus propias formas de socialización de la naturaleza. Generalmente se trata de sectores de la sociedad que basan su reproducción material en mecanismos informales, clandestinos o ilegales. Se trata de sectores que han sido marginados del círculo formal de acumulación, como consecuencia del desempleo o subempleo, de la carencia de tierras debida a la concentración de la propiedad o por la escasez de recursos para entrar a la formalidad. Este sector cada vez más amplio de la sociedad moderna se ve obligado a utilizar sus propias formas de subsistencia, se subemplea en cualquier tipo de actividad, o simplemente se establece en zonas de riesgo por falta de opciones (cañadas, márgenes de ríos y lagunas, zonas de inundación, terrenos inestables, laderas de fuerte pendiente, etc.).

Esto lógicamente constituye una contravención o incumplimiento de las normas del Estado, al no respetarse la normatividad sobre protección de recursos, la reglamentación en construcción de viviendas, los usos del suelo o los planes de ordenamiento. Es como si las condiciones difíciles acentuaran lo que algunos autores han denominado la aceptación social del riesgo, estructurando verdaderas sociedades del riesgo (Luhman, 1993).

En otro caso, se tienen los sectores que si bien no han sido excluidos formalmente por el modelo de acumulación vigente, se benefician de él a través de actividades clandestinas, cuyo producto puede incorporarse al mercado, obteniendo con ello cuantiosas ganancias que se apropian de manera individual. Algunos ejemplos de ello son la explotación maderera, a través de la tala clandestina, la deforestación para utilizar la tierra en actividades agrícolas y ganaderas, la minería ilegal, y la urbanización ilegal mediante el fraccionamiento de zonas protegidas o con alta incidencia de amenazas.

Dadas estas posibles relaciones entre los elementos constitutivos del entorno, emergen un gran número de factores generadores de riesgo, algunos de ellos estrechamente correlacionados. A continuación, se presenta como ejemplo una clasificación de factores físicos, naturales, ecológicos, tecnológicos, sociales, económicos, territoriales, culturales, educativos, funcionales, político institucionales, administrativos y temporales, planteados por Cardona et al. (2003)

Tabla 3. Factores Generadores de Riesgo

Factores Físicos	
Ubicación	
Factores Naturales	
Naturaleza del fenómeno y su magnitud Ecosistemas frágiles Tipo de suelo	Erosión Fenómenos climáticos globales: calentamiento genera elevación del nivel del mar lo que vuelve ciertas costas e islas inhabitables por las inundaciones
Factores Ecológicos	
Deterioro del ambiente	
Factores Tecnológicos	
Tipo de vivienda Fallas técnicas en las construcciones (Altura, material, sistema constructivo, efecto martillo, nivel de mantenimiento)	Calidad de las infraestructuras Tratamiento y abastecimiento en agua
Factores Sociales	
Población IDH Mortalidad al nacer Mortalidad infantil Esperanza de vida Malnutrición Marginalidad Segregación Densidad de población Crecimiento poblacional	Población urbana Densidad poblacional urbana Crecimiento población urbana en los últimos 3 años Género Edad Incapacidad física Organización comunitaria: cooperativas, asociaciones, ONGs, lugar de culto Capacidad de recuperación
Factores Económicos	
Recursos Pobreza PIB y su crecimiento Estructura productiva Poca diversidad económica Marginalización de los mercados Dependencia de situaciones económicas externas Necesidad de importaciones en el campo energético y manufacturero Endeudamiento de los países Apertura económica Concentración de las exportaciones Periferialidad infraestructura Aumento de la deuda externa	Inversiones en salud, educación, Presencia de ramas particulares de la economía: Turismo, agricultura, transporte (redes de vías y sistemas de transporte) Altos costos de flete Falta de acceso a la propiedad Perfiles de acceso de los hogares Oportunidades de ingreso Presupuesto del hogar Acceso al mercado Acceso a bancos Acceso a créditos Activos líquidos de emergencia que un hogar puede vender para comprar alimentos, reconstruir su casa
Factores Territoriales	
Capacidad de alcanzar un nivel apropiado de planeación Leyes que rigen la propiedad del suelo	Hacinamiento de viviendas en los tugurios (perturba los procesos de drenaje y filtración del agua)

Uso del suelo Situaciones de riesgo real ya registradas en el sitio ("desastres" pasados) Urbanización rápida	Guerras Aislamiento del centro de salud y educación Falta de acceso a la propiedad
Factores Culturales	
Historia Casta Religión Etnicidad Clase y relación de clase Estructuras de dominio Ideología	Flexibilidad Falta de ética Alto grado de fatalismo Hábitos tradicionales dañinos No tener una visión multi-amenaza El manejo de las basuras
Factores Educativos	
Tasa de alfabetismo Insuficiente fomento de una cultura de la prevención	Acceso a la información
Factores Funcionales	
Capacidad de respuesta de emergencia	Capacidad de evacuación
Factores Político-institucionales-administrativos	
Patrón de desarrollo Gobernabilidad Estructuras democráticas débiles (escasa participación de la población en los procesos democráticos) Inequidad Falta de voluntad política Malversación (indicador de corrupción, clientelismo) No incorporación de planes de reducción del riesgo en los planes de desarrollo Planes de reducción del riesgo Normas y tipos de normas Guerras Asignación de recursos por parte del estado Reforma agraria Política alimenticia Continuidad de las políticas Políticas de prevención y mitigación Inexistencia de organismo nacional de prevención y atención Inexistencia de órgano técnico Comités Local y Regional (tienen facultades reales y legales?) Baja densidad de centros de salud y de educación	Ubicación institucional de los organismos responsables (ministerios, presidencia, ejército) Existencia de estudios de impacto sobre la comunidad cuando se plantea un proyecto: existe la norma / se aplica la norma Inexistencia o fallas en el código de construcción Capacitación del personal Distribución del presupuesto Falta de coordinación Falta o insuficiencia de mecanismos o instrumentos para la repartición del riesgo financiero (fondos para desastres, pólizas de seguro) Inexistencia de institutos de investigación en los campos (físico-natural, hidrometeorológico, socio-económico, técnico/ingeniería, Ciencias Políticas, Sismología/Vulcanología, Cartografía/Geodesia, Geografía, Geología, Geofísica) No tener una visión multiamenaza Periodicidad de los encuentros de los organismos operativos
Factores Temporales	
Tiempo	Momento (tiempo y duración) en que se presenta el evento

Fuente: Cardona et. al.: 2003

A partir de la segunda mitad del siglo XX fueron elaborándose conceptos entre las diferentes disciplinas que cuestionaban la esencia del paradigma mecanicista. La Teoría de la Complejidad, la Idea de Gaia –según la cual, la Tierra funciona como un organismo vivo–, la Teoría del Caos y conceptos como el de Fractales, y principalmente la visión dialéctico-sistémica sobre la sociedad y la naturaleza, fueron conceptos clave para replantear la visión de la realidad desde la ciencia. Lo ambiental comenzaba a configurarse como un elemento integrador entre la sociedad y la naturaleza. Se comienza a constituir entonces un “paradigma ambiental” teniendo dentro de sus características las de ser (Milbrath: 1996).

- Holístico: al aceptar que los fenómenos del universo están intrínsecamente relacionados en diversos niveles de la totalidad
- Sistémico: al incorporar una perspectiva cibernética en cuanto a la totalidad, la que es estructurada en sistemas de diversa complejidad y jerarquía

- Integrativo – complejo: al concebir a cada sistema, como la unidad dialéctica de las partes, identificada en el plano de la totalidad y aceptando la idea de que tienen la propiedad de estructurarse y organizarse a sí mismos

- Dinámico: al concebir que todas las partes de un sistema están en permanente movimiento, que el organismo o sistema encuentra su estabilidad por la capacidad de adaptación y la búsqueda del equilibrio dinámico y que están en situaciones de una reorganización permanente.

Precisamente esta interpretación, aceptando la teoría de sistemas, las interrelaciones entre factores, la complejidad y el aspecto dinámico de los procesos, es la que se ha ido aplicando a los más recientes estudios de riesgos, principalmente después del trabajo de Wilches-Cháaux (1993) donde se sugiere una visión amplia de análisis. Actualmente la tendencia es a profundizar más en los factores de vulnerabilidad que en los de amenaza, reconociendo el contexto de la situación, buscando en ellos causas de fondo que determinan el riesgo en áreas urbanas, mediante métodos (estadísticos) aproximativos (Lavell: 1993; Chardon: 2002; Cardona: 2001; Cardona: 2004).

Dentro del Paradigma Ambiental un concepto fundamental y articulador, es el de Medio Ambiente. Existen varias maneras de definirlo, dependiendo de la perspectiva disciplinaria desde donde se observe. De esta manera, se establecen diferentes visiones: Visión Biológica, Antropocéntrica, Medio Ambiente como espacio, Medio Ambiente como representación social, Medio Ambiente desde la visión de la ecología humana, Medio Ambiente desde una visión holística.

Para incorporar el tema específico de la Gestión de Riesgos en entornos urbanos, es necesario adoptar un enfoque holístico, partiendo de la teoría del Desarrollo Ecológico de Bronfenbrenner (1979), que va más allá del medio físico para vincular los procesos sociales y culturales que matizan y le dan un carácter particular a los objetos del medio. El ambiente en esta concepción se considera como una estructura total, compuesta por la interrelación de subsistemas en los cuales las personas interactúan y se desarrollan.

Adoptar una perspectiva holística sobre el ambiente significa contemplar al hombre y su medio estructurado en círculos concéntricos, donde los diferentes “medios” interactúan. Aceptar una concepción holística significa entender que no existe un medio ambiente natural, independiente del hombre, ya que se da una estrecha interrelación entre las personas, la sociedad y el resto del medio ambiente. Así, el ser humano y ambiente son indivisibles, debiéndose considerar el sistema social y el sistema natural como partes integrantes de un todo, y no como miembros aislados de un conjunto. (Mateo: 2002). Una visión de este tipo llevará a la interpretación más acertada de los problemas típicos de las ciudades.

Para la mayor parte de los pensadores y teóricos en la modernidad, el Desarrollo ha sido concebido como sinónimo de crecimiento económico, o como signo del progreso social y mejoramiento de la calidad de vida, como se deriva del paradigma racionalista-mecanicista que

estuvo presente en ese momento histórico. Por su parte, el medio biofísico, ha sido pensado como un soporte territorial y de recursos, externo al propio proceso de Desarrollo, ilimitado y sometible a transformaciones y manejos tecnológicos, con tal de que se logaran los propósitos deseados, vinculados principalmente a un mayor acceso al consumo.

A raíz del reconocimiento de estos problemas trascendentales por los que está atravesando la humanidad en su conjunto – entre ellos los riesgos globales y de gran escala como los huracanes, terremotos, tsunamis y, locales y recurrentes como los deslizamientos e inundaciones – y que pone en tela de juicio la supervivencia sobre el planeta, surge la necesidad ineludible de “buscar una nueva visión sobre el desarrollo entre las mallas de una nueva configuración conceptual” (Mateo: 2002).

El punto de partida de esta nueva visión sobre el desarrollo se puede situar en el año 1972, con la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Ambiente Humano, momento a partir del cual comenzó a configurarse un movimiento preocupado por el medio ambiente natural en los países industrializados y en aquellos en vías de desarrollo, incorporando además de la preocupación por las fuentes de recursos, preocupaciones ambientales con el crecimiento y desarrollo económico. En 1987, el concepto de desarrollo sostenible se instituyó mundialmente mediante el respaldo del informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED) (Wilches-Cháux: 1995). Se parte de la proposición de que el medio ambiente consiste en un complejo conjunto de sistemas ecológicos y recursos naturales, cuyo deterioro amenaza el soporte natural de la vida humana y la base del sistema de producción económica. Por lo tanto, cuidar el medio ambiente y administrarlo con prudencia y criterio ecológico se vuelve un principio (el de la sostenibilidad) que ha de orientar todas las actividades sociales. Y en un mundo urbanizado, las ciudades se convierten en centros claves para el desarrollo sostenible (UN-Hábitat, 1996), y los riesgos urbanos, entendidos en toda su magnitud y con todos sus componentes (diferentes y variadas causas o factores de vulnerabilidad y amenaza), toman un lugar importante en la lista de situaciones a tratar o eliminar.

La WCED ha definido el desarrollo sostenible como un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin limitar el potencial para satisfacer las necesidades de generaciones futuras, a través de dos conceptos fundamentales:

- La toma de conciencia de las necesidades, en particular, dándole una prioridad predominante a las necesidades de los pobres del mundo
- La comprensión de que la satisfacción de estas necesidades son limitadas de acuerdo al estado de la tecnología y de las organizaciones sociales.

Las conferencias mundiales sobre Desarrollo Sostenible de la ONU que se han llevado a cabo y las reuniones latinoamericanas y regionales, reflejan lo trascendental del tema para el futuro

mismo de la humanidad. Sin embargo, todavía se afirma que el gran desafío del momento es el diseño de un cuerpo analítico y operacional lo suficientemente convincente que permita enfrentar la problemática de las profundas interrelaciones entre Desarrollo y Medio Ambiente.

El concepto de Desarrollo Sostenible ha tenido muchos críticos. Para algunos se trata de una “utopía axiomática”, fácil de entender y aceptar teóricamente, pero cuya puesta en práctica resulta irreal; se trata solo de buenas intenciones. Para otros se concibe como una concepción de moda de las corrientes neoliberales que propugnan unos cambios para remediar y maquillar, pero que en esencia no persiguen ningún cambio en la estructura misma del sistema. (Mateo: 2002).

Sin embargo, considerando la coyuntura actual que viven las sociedades, se pretende encontrar caminos para el cambio, teniendo en cuenta la necesidad de la humanidad por re-analizar su forma de pensar. De esta reflexión se deberían derivar prácticas referidas a la utilización del medio en el que se vive y la relación con él. Se habla del paso de un paradigma antropocentrista productivista a uno ecocéntrico, naturalista y ambiental. Se trata de re-contextualizar y re-conceptuar la noción de desarrollo desde el paradigma de la complejidad, adoptando una perspectiva sistémica. Lo anterior, aplicado a las ciudades, se refiere sencillamente, a la posibilidad de sostenimiento de la ciudad en el tiempo, a la capacidad de “ser sostenible” en la dimensión temporal.

Considerar los desastres como “problemas no resueltos del desarrollo” es una tendencia de uso común en América Latina hoy en día. Claramente tal idea encierra una contradicción obvia dado que el “riesgo” que condiciona la existencia posterior de un desastre debe también ser visto como un producto de los modelos históricos de “desarrollo” sufridos en la región y sus consecuencias en términos de pobreza, desigualdad, exclusión social, distribución de ingresos, acceso a la tierra, etc.

Los condicionantes sociales y ambientales de los desastres, y la naturaleza de las relaciones entre desastres y desarrollo, han sido objeto de una creciente atención por parte de investigadores en el área de los riesgos y los desastres en América Latina durante los últimos quince años, y particularmente desde principios de la década de los 90, estableciendo una línea de continuidad con las ideas vertidas por Cuny, Hewitt, Westgate y otros en Europa y Norteamérica con anterioridad. Esta línea de indagación, de características multidisciplinarias y con una fuerte presencia de profesionales de las Ciencias Sociales, ha sido promovida en gran medida dentro de un enfoque informado por la idea de que los desastres representan “problemas no resueltos del desarrollo”.

Reiterando las ideas anteriores, el desequilibrio que generan los asentamientos humanos en el territorio reside en la presunción occidental de que la naturaleza existe para ser dominada y utilizada, lo cual está en la base de la llamada crisis ambiental de la actualidad. Otra parte de la explicación reside en el imperativo de las modalidades de crecimiento económico, en boga durante

las últimas décadas, pero esencialmente desde el inicio de la Revolución Industrial, tipificada entre otras cosas por la acelerada transformación de la sociedad de una relación inmediata con la naturaleza, en una donde dominan las relaciones mediatas; la urbanización desecologizada; la búsqueda de la ganancia a corto plazo; el empobrecimiento de grandes masas de la población, su marginalización en el territorio y su inseguridad frente a la vida cotidiana. La sociedad moderna es la nueva Sociedad del Riesgo (Luhmann, 1993).

Ahora bien, aunque es cierto que el factor dominante en la condición de desastre es la vulnerabilidad de la sociedad, la cual comprende múltiples facetas particulares (Wilches Chaux, 1993), también es cierto que por la intervención humana en los ecosistemas y por el desarrollo de nuevas tecnologías de producción y transporte, se genera una gama nueva de amenazas, las cuales difícilmente podrían llamarse “naturales”, pero que se suman, y amplían el rango de amenazas existentes, y al fin de cuentas son parte importante de la ecuación del desastre.

Una categoría de estas nuevas amenazas ha recibido el nombre de “socionaturales” (Lavell, 1996). Comprenden amenazas que toman la forma de amenazas naturales y, de hecho, se construyen sobre elementos de la naturaleza. Sin embargo, su concreción es producto de la intervención humana en los ecosistemas y ambientes naturales. Se producen en la intersección de la sociedad con la naturaleza. Así por ejemplo, la destrucción de las cuencas y la deforestación contribuyen en determinados casos a un aumento en la incidencia e intensidad de inundaciones, deslizamientos y sequías; la urbanización sin infraestructuras adecuadas para el drenaje pluvial cambia el equilibrio del ecosistema local, generando inundaciones urbanas; el corte de manglares en las costas contribuye a la erosión costera y al impacto negativo de las tormentas y huracanes. La manifestación más extrema de este tipo de intervención negativa sobre la naturaleza, sin lugar a dudas, está constituida por los procesos de reducción de la capa de ozono y el cambio climático global, procesos que se pronostica tendrán repercusiones futuras importantes, en términos de la fuerza de huracanes, los patrones de lluvia e inundación y sequía.

Un lugar común de ambos conceptos está constituido por los asentamientos humanos; allí convergen claramente las intervenciones sobre el entorno natural y los procesos sociales de ocupación del territorio. Esta relación dinámica genera escenarios de riesgos en múltiples escalas que van mutando en la medida que se va interviniendo el entorno o a raíz de las dinámicas propias de la sociedad

1.2.2. Modelos de desarrollo y riesgos

Históricamente, en América Latina, la concepción que se tiene de los desastres naturales hace referencia a las relaciones sociales y a la relación histórica entre la sociedad y la naturaleza. Generalmente se ha puesto el énfasis en los momentos posteriores a la ocurrencia de eventos, a la atención de los efectos sociales, las estrategias de adaptación y prevención, los conflictos sociales y

el manejo de los desastres por parte de grupos dominantes para preservar su posición política, social y económica a través de la instrumentalización del estado.

Los desastres, aun cuando claramente afectan, no frenan en mayor medida el desarrollo (Albala Bertrand, 1993). Al contrario, el problema más relevante es que los desastres son la consecuencia lógica e inevitable del subdesarrollo. El subdesarrollo, la insostenibilidad ambiental y la pobreza, son las causas inmediatas y principales de los desastres. Los desastres no arrojan a los pobres a un estado de subdesarrollo. Al contrario, ellos están allí antes del desastre. Si el desastre los proyecta de un estado de pobreza a un estado de miseria completa, éste no es un problema causado por el desastre en sí; se trata de un problema de fondo, que está vinculado con dónde estaban los pobres antes del desastre. Cuando alguien está en el límite de la supervivencia no requiere más que un pequeño empujón para ser arrojado a la desesperación y la miseria total. Esta situación no afecta a las personas o sectores que controlan recursos, poder y opciones para escoger sus condiciones y circunstancias de vida. Éstos pueden resultar afectados, pero raramente estarán económica o físicamente destruidos o inhabilitados. Los desastres rara vez los empujan hacia el límite. Ahorros, seguros, redes sociales y otros mecanismos, los proveen de condiciones de resistencia y adaptabilidad, y de la capacidad de hacer frente a los problemas que sufren y rápidamente les permite recuperarse (Lavell, 2010).

Esta situación ha llevado a proponer el denominado “paradigma de la vulnerabilidad” como marco interpretativo para la explicación de la ocurrencia de los desastres. Las premisas de este paradigma están, por supuesto, abiertas al debate y cuestionamiento. Sin embargo, actualmente pocos se apegarían a la idea de que los desastres son el resultado unilateral de un evento físico de magnitud, haciendo impacto en una sociedad neutra. Hoy, la referencia a la vulnerabilidad como factor causal de los desastres es casi obligatoria, aun cuando muchos solamente la mencionan sin mayor profundización en su significado y complejidad. El que muy poco se haya hecho para reducir la vulnerabilidad, en una década en que la reducción de los desastres estuvo de moda como idea, puede explicarse por la simple razón de que esto requeriría de cambios fundamentales en los patrones de crecimiento y desarrollo vigentes, los cuales, dadas las circunstancias y el statu quo existente, son difíciles, cuando no imposibles de lograr, en un sentido cabal (Lavell, 2000).

El dominio que ejercen las soluciones ingenieriles en la reducción del riesgo, o los preparativos, refleja su menor grado de aceptabilidad política, al comparárselas con medidas que promoverían la redistribución del ingreso, la reducción significativa de los niveles de pobreza, el empoderamiento de las comunidades, la planificación racional del uso del suelo y el manejo sostenible del ambiente como medidas que proveerían una base real para reducir la vulnerabilidad (Lavell, 2000).

Resulta más fácil negar la naturaleza estructural de la vulnerabilidad y el riesgo, explicándola como un factor colateral, desatendido, olvidado o soslayado de los modelos de crecimiento, que

asumir las consecuencias que su causalidad estructural exigiría. Es más fácil confortarse apoyando el rumbo impuesto con los modelos, buscando mejorarlos, introduciendo mecanismos cosméticos y efímeros para reducir el riesgo, que asumir el reto de la vulnerabilidad como algo estructuralmente determinado, entonces puede reducirse haciendo ajustes al margen, modificando la constitución de los proyectos de desarrollo por haber introducido como criterio la reducción de la vulnerabilidad (Lavell, 2000).

Una parte importante del problema conceptual relacionado con la vulnerabilidad y su relación con el desarrollo deriva de dos situaciones particulares:

Primero, crecimiento económico y desarrollo muchas veces se consideran sinónimos. Dada esta situación, entre las personas dedicadas al tema de los desastres es común que se refieran a cualquier proyecto de inversión como si se tratara de un proyecto de desarrollo en el sentido más amplio del término, sin considerar, por ejemplo, sus impactos en relación con los indicadores que componen el Índice de Desarrollo Humano de las Naciones Unidas o cualquier otro índice o indicador comprensivo del desarrollo. Con esta imprecisión no es difícil sugerir que proyectos de desarrollo pueden aumentar o disminuir la vulnerabilidad. Sería más preciso, sin embargo, afirmar que los proyectos e inversiones económicas pueden incrementar o no la vulnerabilidad y dejar el nombre de “desarrollo” para algunos de aquellos que no lo hagan. Esto no resuelve por sí el problema de los proyectos que promueven ciertos parámetros de desarrollo, tales como un mejoramiento en los niveles de educación y salud, mientras a la vez no garantizan la construcción de escuelas y hospitales resistentes a las amenazas. Sin embargo, nos mueve en la dirección correcta para eliminar la contradicción implícita en la idea de que el desarrollo puede aumentar o disminuir la vulnerabilidad. Realmente es difícil concebir el desarrollo como un proceso que aumenta significativamente las posibilidades de muerte, o de sufrir daños y pérdidas (Lavell, 2000).

Segundo, retomando las conclusiones anteriores, la vulnerabilidad es muchas veces concebida como exógena y no endógena al proceso de desarrollo. La vulnerabilidad se convierte en una variable independiente que puede ser modificada negativa o positivamente por el desarrollo. No se considera parte del proceso de desarrollo o subdesarrollo en sí. Esto no es un argumento sostenible. El desarrollo no puede conducir a un aumento en la vulnerabilidad. De hecho, desde la perspectiva de Lavell (2000), la reducción del riesgo debe considerarse un componente definitorio del desarrollo y como tal incluirse como uno de los indicadores utilizados en la construcción del Índice de Desarrollo Humano de las Naciones Unidas.

Aunque no es difícil entender por qué los gobiernos defienden los modelos que impulsan, y por qué en el mundo actual, en que rigen la globalización, la economía neoliberal, el ajuste estructural y la privatización, no es sencillo escapar a la lógica inherente del modelo y de sus consecuencias sociales, tampoco se puede soslayar la interrogante fundamental, en cuanto a si es

posible reducir significativamente la vulnerabilidad, sin cambiar los parámetros del modelo en sí (Lavell, 2000).

Esta pregunta tiene particular importancia referida a la vulnerabilidad que afecta a las masas de pobres rurales y urbanos quienes tienen muy poco acceso a los recursos, poder y mecanismos de selección que se requieren para cambiar significativamente sus condiciones materiales de vida. Estas personas y la vulnerabilidad que sufren terminan siendo el resultado necesario y supuestamente no estructural de la política adecuada de crecimiento y desarrollo de alguien más. Cualquier esfuerzo para reducir de forma significativa los niveles de vulnerabilidad existentes, mientras se mantengan los parámetros básicos de los modelos de crecimiento vigentes en la región, claramente requeriría de mecanismos de compensación social que exceden por mucho las posibilidades y capacidades financieras o la voluntad política de los gobiernos, aún los más avanzados en concepción social y humanitaria. Es extremadamente difícil pensar aquí en un modelo de crecimiento que conduce continuamente a la pobreza, y que se acompaña, a la vez, de una política social impulsada por un gobierno que garantiza que los pobres viven en condiciones de seguridad ambiental, en tierras no riesgosas, y con viviendas y condiciones de vida seguras (Lavell, 2000).

Si la vulnerabilidad constituye un componente estructural de los modelos, entonces, sin cambios fundamentales, es inevitable que los desastres sigan manifestándose, probablemente con mayores impactos en el futuro. Desastre se convierte en una condición y resultado necesario para el “desarrollo” como se plasma hoy en día. Constituyen parte del proceso mismo y son el precio a pagar por las ganancias logradas, al seguir un modelo de crecimiento que garantiza la pobreza y vulnerabilidad para muchos y el bienestar para otros (Lavell, 2000).

La ampliación de la agricultura comercial – monopolizada – ha conducido a la marginalización de la población campesina y a la ocupación creciente y continua de tierras de alto riesgo en el campo y la ciudad. Migrantes urbanos han sido obligados a ocupar tierras en pendiente y sin adecuados sistemas de control de aguas o de procesos desestabilizadores de terrenos en pendiente. Las ciudades han crecido anárquicamente, de forma des-ecologizada, sin adecuada planificación del uso del suelo y de las infraestructuras urbanas, convirtiéndose en espacios de riesgo y desastres naturales (Lavell, 2000).

En suma, estos son algunas de las consecuencias del modelo de crecimiento implantado y sus resultados “naturales”, en términos de la vulnerabilidad, el riesgo y desastre. Estas condiciones son parte del modelo, son inherentes a él y en consecuencia, están estructuralmente determinadas. La degradación ambiental, la urbanización rápida, la fuerza de trabajo barato y la pobreza, son tanto consecuencias como necesidades del modelo, al igual que los patrones de concentración de las ganancias logradas (Lavell, 2000).

Esto permite apreciar que cuando se analiza la relación entre desastre y desarrollo, no es posible llegar a una conclusión objetiva si no se considera también, la forma en que el crecimiento económico y el desarrollo, concentrados en determinados sectores privilegiados, producen las condiciones para que el desastre suceda, afectando así el progreso futuro. Las conclusiones y consecuencias que se derivan de un análisis puesto en su contexto histórico, que considera los dos momentos del desastre – su causalidad y su impacto – son importantes y deben ser tomadas en consideración (Lavell, 2000).

1.3. Urbanización, Ordenamiento Territorial y Riesgos

“Desastre” se asocia en la mente de la mayoría, con eventos de gran magnitud, importantes pérdidas de vida, de bienes y producción, con la necesidad de la movilización de grandes cantidades de ayuda humanitaria y con sustanciales costos para el proceso de rehabilitación o reconstrucción de las sociedades afectadas (Lavell, 2010), pero existen otros eventos de consecuencias más contenidas, que ocurren con cierta recurrencia, también detonados por fenómenos naturales, que tienen impactos acumulativos, y muchas veces pasan desapercibidos dadas las definiciones o umbrales mínimos requeridos para ingresar a las bases de datos (por ejemplo, EmDat o Desinventar).

En muchos lugares, este tipo de desastres pequeños ocurren regularmente. Existe una creciente evidencia de que la suma de los impactos negativos de estos “no desastres” recurrentes se aproximan, si no exceden acumulativamente, a aquellos asociados a los grandes pero poco recurrentes eventos. Afectan a muchas localidades de forma reiterada, y pueden considerarse antecesores e indicadores de eventos futuros de mayor envergadura. Los eventos pequeños recurrentes erosionan de continuo la capacidad de desarrollo de las zonas y poblados afectados, y conducen a una inexorable acumulación de vulnerabilidades, que hace que el efecto de los grandes sea más agudo una vez suceden (Lavell, 2010).

Las pérdidas generadas por distintos tipos de eventos pueden expresarse gráficamente mediante una curva (

Figura 3) que presenta en el eje horizontal el monto en términos económicos (o humanos) de dichas pérdidas, y en el eje vertical la frecuencia de excedencia de las mismas, en número de veces al año. Este gráfico se conoce como estratificación del riesgo, y fue originalmente propuesto para el Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2010 (ISDR, 2010); divide los eventos en cuatro sectores o “estratos” de riesgo; un primer estrato muestra eventos frecuentes que producen pérdidas menores; el segundo presenta una frecuencia moderada con pérdidas intermedias; el tercero con una frecuencia menor y pérdidas grandes; y el cuarto, con eventos muy esporádicos cuyas pérdidas presentan un carácter realmente catastrófico.

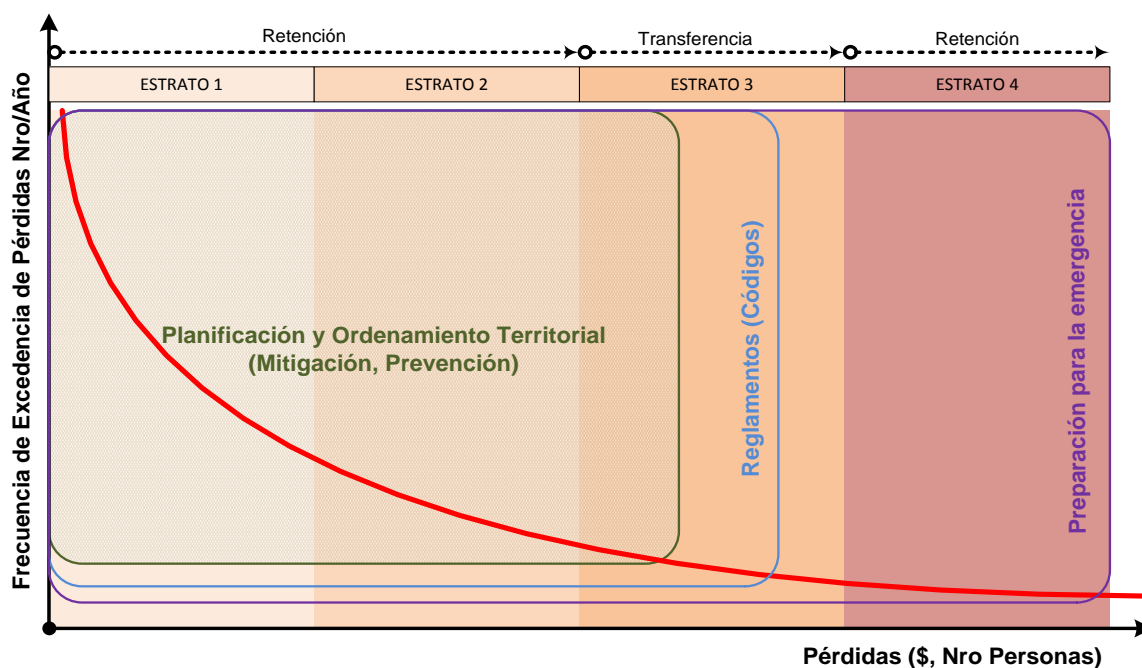


Figura 3. Estratificación del riesgo (Adaptado de ISDR, 2010)

En cuanto a las formas de enfrentar estas pérdidas potenciales, la Planificación y Ordenamiento Territorial, a través del planteamiento de acciones de prevención y mitigación en función de un estado deseable de la ciudad – o imagen objetivo –, debería poder atender hasta eventos con niveles de daños grandes y frecuencias de excedencia altas. Mediante reglamentos o códigos, como las Normas de Construcción Sismoresistente, deberían poderse enfrentar eventos con menor frecuencia y mayores daños. Y por último, en cualquier caso, la sociedad debería estar preparada para atender las emergencias producidas por eventos muy poco frecuentes con potenciales daños catastróficos. En cuanto al mecanismo financiero para enfrentar eventos, la retención del riesgo es posible para eventos con frecuencias moderadas y altas y pérdidas menores e intermedias; la transferencia, por medio de seguros por ejemplo, sería posible para asumir eventos grandes de menor frecuencia; y la retención residual permitiría recuperarse de los eventos raros y catastróficos.

Esta forma de visualizar el riesgo es útil para resaltar la importancia que tiene la Planificación y Ordenación del Territorio, pues es una estrategia que permite, a través del uso racional del suelo y los recursos, enfrentar situaciones de riesgo, evitando posibles pérdidas futuras, bajo eventos con frecuencias altas, moderadas e incluso menores.

Bajo este enfoque, mediante planificación territorial, podrían enfrentarse la mayoría de situaciones recurrentes de alta frecuencia y consecuencias leves, que azotan a la mayoría de ciudades latinoamericanas año tras año; especialmente relacionadas con eventos de **deslizamientos e inundaciones**.

Es claro que bajo las condiciones actuales de la mayoría de ciudades latinoamericanas, no todos los grupos sociales comparten el mismo nivel de vulnerabilidad. Adicionalmente, ser vulnerable solo tiene sentido en un contexto de riesgo. Puede ser lógico considerar que la posibilidad de impactos negativos está distribuida en grupos específicos mediante mecanismos sociales. ¿Cuál es el proceso que genera vulnerabilidad y puede llevar el riesgo a territorios específicos?, ¿cómo llegaron algunos grupos sociales a ocupar lugares de amenaza?, ¿cómo se gestaron los escenarios de marginalidad actuales?, son preguntas cuya respuesta tiene lugar en situaciones previas que obedecen a procesos condicionantes históricos, incluso gestados a través de los propios modelos de desarrollo adoptados en cada lugar, y su explicación debe buscarse mediante la aplicación de enfoques socioculturales como los descritos en la Sección 1.1.

Resulta claro que la vulnerabilidad es socialmente construida en un contexto particular. Es una consecuencia de procesos históricos, políticos y culturales (Braudel, 1969; García Acosta, 2005) y de los patrones de distribución del ingreso, inversiones, concentración del poder y transformaciones ambientales. Los modelos PAR pressure and release de Blaikie, Cannon, Davis and Wisner, muestran que los desastres son la intersección de dos fuerzas opuestas: aquellas que generan vulnerabilidad por un lado y la exposición física por el otro (Blaikie et al, 1996). Desde los años 1970s, los enfoques de la ecología política (Cuny, 1983; Wijkman and Timberlake, 1984) conectan la vulnerabilidad con inequidad en proyectos de desarrollo. Cuny (1983) plantea que los desastres acentúan las luchas sociales en una sociedad y enfatiza las injusticias inherentes en un sistema político.

En este sentido, cuando se busca incorporar el riesgo a los planes de ordenamiento, aunque se reconoce la importancia de los procesos mencionados, se debe reconocer su existencia como un hecho cumplido, y operar desde allí. Razón por la cual se hace énfasis en la exposición como condicionante físico de vulnerabilidad, más que en los procesos que llevaron a la materialización de esta exposición.

1.3.1. Urbanización en Colombia y segregación urbana

En el caso colombiano, hacia el inicio de la década de 1930, en términos generales, se aceleraron los procesos de urbanización e industrialización. Como producto de esta situación se empiezan a escindir las ciudades en dos: una con hábitats dignos y seguros y otra con población segregada viviendo en riesgo de desastres.

Así como la vulnerabilidad es producto del orden social, las amenazas son determinadas por la socialización que se hace de la naturaleza. En este sentido, se habla de la construcción social del riesgo, entendida como el proceso histórico, en que se configuran tanto amenazas como vulnerabilidades, producto de las características de la sociedad y de su relación con el entorno natural. La recomposición de las relaciones internacionales en los planos económico y político,

posterior a la crisis financiera de 1929, marcó el comienzo de un proceso de crecimiento urbano en América Latina que recorrió todo el siglo XX, y que en el caso de algunas ciudades como Manizales y Medellín, constituyó el contexto causal de los desastres llamados 'naturales', dadas las condiciones sociales y ambientales que se fueron configurando con él.

Como ejemplo de este proceso, entre 1951 y 1973 la población de Medellín creció más de tres veces, pasando de 358.819 a 1'150.762 habitantes, situación que se reflejó en el aumento de la urbanización y en la expansión de la ciudad hacia el norte y hacia el sur en las dos vertientes del valle. Este crecimiento de la 'mancha urbana' coincidió con la ocurrencia de desastres asociados a inundaciones "en diversos sectores de todos los costados" de la ciudad: barrios del oriente, nororiente, suroriente, suroccidente, occidente y otras zonas cercanas a las cuencas de las quebradas Iguaná, Picacha, Ana Díaz y Los Huesos en la parte occidental de la ciudad. Así mismo, se presentaron desastres asociados a deslizamientos en el oriente, nororiente y noroccidente. En este período, la frecuencia y el área de ocurrencia de los desastres asociados a deslizamientos e inundaciones aumentaron a tal punto que la acción institucional, que consistía básicamente en atender las situaciones de emergencia con el Departamento de Bomberos y algunos cuerpos de seguridad, se hacía ineficaz. Esta situación ya era notoria a finales de la década de 1960, cuando en la prensa se afirmaba que el personal de bomberos era "insuficiente a todas luces" (Serna: 2011).

El crecimiento de Medellín continuó entre 1970 y 1990 hasta la saturación del espacio urbano. Al urbanizar laderas cada vez más altas y periféricas y zonas más próximas a las quebradas, especialmente en los extremos oriental, occidental, nororiental y noroccidental de la ciudad, los desastres asociados a deslizamientos e inundaciones se hicieron más recurrentes. El desequilibrio en la ocupación del suelo evidenciaba la segregación espacial de la estructura urbana de Medellín: en la década de 1980, en el centro de la ciudad había 67 habitantes por hectárea, mientras en un barrio de población pobre por cada hectárea vivían 419 personas. Por esto, cerca de 1990 se hablaba de la existencia de dos ciudades: la de las clases altas y medias con un hábitat seguro y digno y la de las clases populares, donde sus habitantes vivieron "hacinados en zonas de alto riesgo" (Serna: 2011).

Si bien el crecimiento de la población urbana no representa en sí mismo un problema, en América Latina los efectos negativos de este crecimiento están muy relacionados con las dinámicas generadoras de pobreza y de violencia; elementos que propician la aparición de riesgos. Según datos de la Comisión de las Naciones Unidas para Asentamientos Humanos, cerca de 40% de los residentes urbanos de América Latina y El Caribe vive hoy en asentamientos marginales, espontáneos o ilegales. Las ciudades reciben migraciones de población, sin que existan las condiciones apropiadas para la satisfacción de necesidades básicas, y menos aún, las condiciones adecuadas para mantener un entorno con calidad ambiental. La mayoría de los asentamientos marginales están localizados en áreas en las que se convive con problemas identificables:

contaminación del suelo, del aire, del agua, procesos de erosión y hacinamiento. En el decenio del 90, las estadísticas regionales muestran que el 65% de las familias pobres vive en zonas urbanas donde no tienen cubiertas las necesidades básicas y sobreviven en condiciones de alta marginalidad – hacinamiento, viviendas inadecuadas, acceso insuficiente al agua potable y a la infraestructura sanitaria – (PNUMA: 2002).

Como consecuencia de lo anterior, en muchos casos, es difícil determinar la relación causal de los riesgos de origen natural-antrópico. Así, el riesgo de deslizamiento por ejemplo, aparece como consecuencia, generalmente, del asentamiento de grupos humanos pobres en laderas de fuerte pendiente, inapropiadas para la urbanización, agravándose con la deforestación y el manejo inadecuado de las aguas lluvias y servidas que trae consigo el asentamiento marginal. Sin embargo, la causa de tal deslizamiento no es necesariamente producto de que la población se asiente en lugares peligrosos, sino el hecho de que escogió ese sitio debido a que no tenía otras opciones por la limitación de acceso a tierra urbana habitable (Wilches-Cháux: 1993).

Para los años setenta, ciudades como Lima, Guatemala, México, Río de Janeiro, Delhi, El Cairo, Manila, etc. se habían vuelto muy vulnerables, con poca capacidad para absorber el impacto de las amenazas o para recuperarse de éstas. Se puede afirmar razonablemente que muchos de los desastres urbanos de los años setenta y ochenta (Managua 1972, Guatemala 1976, México 1985, San Salvador 1986, etc.) fueron causados por una concentración de factores de vulnerabilidad a consecuencia de dichos cambios (Maskrey: 1998).

De acuerdo con José Luis Romero, durante el proceso de crecimiento y masificación de las ciudades latinoamericanas en el siglo XX, grandes grupos de población sufrieron una doble marginalidad que involucraba lo espacial y lo social: excluida de la distribución de la riqueza, y a veces de la reproducción de la misma, la población pobre tuvo que irse a vivir en lugares periféricos, generalmente poco idóneos para el establecimiento de viviendas. En el caso de Medellín, la fuente da cuenta de sucesos desastrosos producidos por condiciones de vulnerabilidad asociadas a esa doble marginalidad: las personas afectadas estaban asentadas en lugares no aptos para vivir y en unas condiciones de pobreza que acentuaban el carácter inadecuado del hábitat respecto a la ocurrencia de fenómenos naturales (Serna: 2011)

En cuanto a la ciudad de Manizales, la situación fue similar; especialmente hacia 1950 empezaron a aparecer barrios ilegales, impulsados por la necesidad de ciertos sectores de la población que carecían de recursos y ocupaban terrenos ubicados en la periferia. Esta situación llevó a la creación de barrios que posteriormente mostraron recurrencia de eventos de deslizamiento incluso con víctimas y damnificados, dada la tipología de construcción y las características del terreno de asentamiento. En el Anexo A se presenta un análisis de la evolución

urbana de la ciudad a lo largo de su historia, para contextualizar, dado que aplicaciones posteriores de esta tesis la han considerado como área de estudio.

1.3.2. Ordenación Urbana en Colombia

Los primeros antecedentes sobre la ordenación de la estructura urbana en Colombia datan de tiempos de la conquista, con las Ordenanzas de Población de Felipe II en el año 1573, que constituyeron una primera política urbanística en la época, a manera de código político urbano. Las ordenanzas ya se planteaban a lo largo de 10 capítulos el dilema de elección del lugar en el cual establecer a la población. Ya se planteaba la forma de ocupación en retícula ortogonal conocida como damero. Bajo esta tipología se fundaron las nuevas poblaciones, en algunos casos con dificultades en su implantación debidas a la topografía.

En el caso colombiano esta estructura fue la regla en la mayoría de ciudades; sin embargo, se empezaron a notar debilidades en el modelo ortogonal determinadas por el relieve, razón por la cual el urbanista Karl Brunner en la primera mitad del siglo XX plantearía la necesidad de modificar el modelo (Hofer, 2003). Se empezaban a evidenciar otros obstáculos adicionales a los netamente financieros o políticos para los proyectos de renovación urbana de las ciudades: la subdivisión del suelo en uso público y privado y el sistema reticular.

A partir de finales del siglo XIX, Colombia asume el papel de productor agrícola, con la consecuente construcción de grandes obras de ingeniería como puertos o líneas férreas como opciones de transporte que determinarían las transformaciones urbanas que entran en conflicto con el modelo ortogonal.

Ejemplos de obstáculos para la implantación del modelo urbano generados por la topografía se evidencian en intentos por intervenir cauces mediante su canalización para poder hacer vías rectas, esquivando dificultades topográficas en ciudades como Medellín, cuando el terreno plano ya se había ocupado. Las laderas empezaron a ocuparse siguiendo en la medida de lo posible la curvatura natural del terreno. En la ciudad de Bogotá la introducción del tranvía determinó el crecimiento de la ciudad en el sentido norte-sur, generando una ciudad lineal en las primeras décadas del siglo XX. En el caso de Manizales las nuevas estaciones de ferrocarril y cable aéreo constituyeron polos de urbanización generando también nuevas formas urbanas, y con el agotamiento del terreno plano, la utilización de los denominados “rellenos hidráulicos” fue muy común para adecuar lotes en laderas.

En cuanto a un antecedente de planificación en Colombia, en el sentido de instrumento, puede citarse la figura de Plano Regulador, establecida por la Ley 88 de 1947. Esta figura fue adoptada y aplicada por países europeos y norteamericanos a partir de 1920, siguiendo los planteamientos de los Congresos Internacionales de Arquitectura Moderna CIAM (Castillo y Salazar, 2001). Es entonces cuando las tres ciudades más grandes del país deciden elaborar

simultáneamente sus planes de ordenación y futuro crecimiento, en el caso de Bogotá, orientado por Le Corbusier.

El objetivo de los planes fue delimitar el perímetro urbano y las áreas de actividad mediante la definición de una política de desarrollo urbano con horizonte de 15 años, lo cual requería un reglamento de zonificación y control sobre los usos del suelo, un plan vial y la adecuada provisión de servicios públicos.

El lema utilizado para identificar este nuevo modelo de desarrollo en Colombia fue el de “ciudades dentro de la ciudad”, teniendo como características la descentralización del empleo, el policentrismo, la disminución de los recorridos.

A partir de la Ley 9 de 1989, por primera vez en Colombia se dispone la obligatoriedad de incluir en los Planes de desarrollo, acciones concretas para la intervención del territorio, y la definición de responsabilidades y competencias con respecto a la visión del territorio, y a la visión de futuro de los municipios. Adicionalmente, el decreto ley 919 de 1989, insta a través de su artículo 6 a las entidades territoriales a incorporar el componente de prevención de desastres en los procesos de planificación territorial, sectorial y de desarrollo.

De acuerdo con los lineamientos de la Ley 388 de 1997 de Ordenamiento Territorial, los municipios están en la obligación de formular los Planes de Ordenamiento Territorial, conteniendo, entre otros aspectos, las determinantes y componentes relacionados con el tema de riesgos: “políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales”.

A continuación, en la Tabla 2 se describen las leyes o decretos que en Colombia Obligan a la incorporación de la Prevención y Reducción de Riesgos en la planificación territorial.

Tabla 2. Legislación en el tema de Riesgos y Ordenamiento Territorial en Colombia

Ley / Decreto	Obligaciones relacionadas con Prevención y Reducción de Riesgos y Ordenamiento Territorial
Constitución Política de 1991	<p>La constitución Política reglamentó entre otras disposiciones:</p> <p>Artículo 2. Son fines esenciales del Estado: servir a la comunidad, promover la prosperidad general y garantizar la efectividad de los principios, derechos y deberes consagrados en la Constitución; facilitar la participación de todos en las decisiones que los afectan y en la vida económica, política, administrativa y cultural de la Nación; defender la independencia nacional, mantener la integridad territorial y asegurar la convivencia pacífica y la vigencia de un orden justo.</p> <p>Las autoridades de la República están instituidas para proteger a todas las personas residentes en Colombia, en su vida, honra, bienes, creencias, y demás derechos y libertades, y para asegurar el cumplimiento de los deberes sociales del Estado y de los particulares.</p> <p>En cuanto al manejo de los recursos naturales se reglamentaron disposiciones sobre la vivienda digna y el manejo de los recursos naturales para garantizar el desarrollo sostenible (prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental). Como primer paso para la Planeación, definió la obligatoriedad para las Entidades Territoriales de elaborar su Plan de Desarrollo. Se dispuso además en un esquema de descentralización, que el Estado delegaría en las entidades locales la responsabilidad de conocer, y atender en forma integral los recursos naturales, y tomar acciones sobre su manejo.</p>
Normatividad relacionada con el Riesgo	
Ley 46 de 1988	Por medio de la cual se reglamenta la creación del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de

Ley / Decreto	Obligaciones relacionadas con Prevención y Reducción de Riesgos y Ordenamiento Territorial
	Desastres – SNPAD.
Decreto Ley 919 de 1989	<p>Por el cual se establece la obligatoriedad de trabajar en prevención de 1989 de riesgos naturales y tecnológicos especialmente en disposiciones relacionadas con el ordenamiento urbano, las zonas de alto riesgo y los asentamientos humanos y se crea el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres, determinando las responsabilidades, estructura organizativa, mecanismos de coordinación e instrumentos de planificación y financiación del sistema a escala nacional, regional y local.</p> <p>Se incluye además, el componente de prevención de desastres en los Planes de Desarrollo de las Entidades territoriales y se define el papel de las Corporaciones Autónomas Regionales en asesorar y colaborar con las entidades territoriales para los efectos de que trata el artículo 6, mediante la elaboración de inventarios y análisis de zonas de alto riesgo y el diseño de mecanismos de solución.</p>
Decreto 93 de 1998	<p>Por el cual se adopta el Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres PNPAD, el cual define los objetivos, principios, estrategias y programas de la Política Nacional. Los tres objetivos básicos de la política son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de riesgos y prevención de desastres. • Respuesta efectiva en caso de desastres • Recuperación rápida de zonas afectadas. <p>Estos objetivos se alcanzan a través de cuatro estrategias:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El Conocimiento sobre los riesgos (naturales y antrópicos) • La incorporación de la prevención de desastres y reducción de riesgos en la planificación • El fortalecimiento del Desarrollo Institucional • La socialización de la prevención y la mitigación de desastres.
CONPES 3146	<p>Por el cual se define la “Estrategia para consolidar la ejecución del de 2001 Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres – PNPAD”.</p> <p>Esta estrategia define acciones específicas y busca comprometer a las entidades en el cumplimiento del PNPAD.</p>
CONPES 3318	<p>Mediante el cual se autoriza a la Nación para contratar un crédito de 2004 hasta por US \$263 millones para financiar el Programa de Reducción de la Vulnerabilidad Fiscal del Estado frente a los Desastres Naturales.</p>
	Normativa relacionada con Diseño y la construcción sismo resistente,
Ley 400 de 1997	<p>Por el cual se reglamentaron las construcciones sismo-resistentes. En 1984 surgió el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, reemplazado en 1998 por la Norma Colombiana de Construcciones Sismo Resistentes NSR-98 (aún vigente). En ella se establecen entre otros aspectos: i) Las responsabilidades y sanciones en que incurren los profesionales diseñadores, los constructores, los funcionarios oficiales y las alcaldías, al incumplir la Ley; ii) Los incentivos para quienes actualicen las construcciones existentes a las nuevas normas; iii) La obligación de realizar análisis de vulnerabilidad para las edificaciones indispensables existentes en un lapso de tres años, y a repararlas en caso que sean deficientes, con un plazo máximo de seis años. Fue reglamentado posteriormente por los Decretos 1052/98, 33/98, 34/99, y 2809/00.</p>
	Normativa relacionada con Desarrollo y Ordenamiento Territorial,
Ley 09 de 1989	<p>Por la cual se definió la responsabilidad de las autoridades municipales de Reforma Urbana en cuanto a la seguridad de los habitantes de las zonas urbanas ante los peligros naturales, estableciendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La obligación de los municipios con la asistencia de las oficinas de Planeación de levantar y mantener actualizado el inventario de las zonas que presenten altos riesgos para la localización de asentamientos humanos (inundación, deslizamiento). • La obligatoriedad de adelantar programas de reubicación de los habitantes, o proceder a desarrollar las operaciones necesarias para eliminar el riesgo en los asentamientos localizados en dichas zonas. <p>En cuanto al territorio, la ley establece la función social de la propiedad permitiendo la intervención del Estado directamente sobre la especulación del mercado de las tierras, creando mecanismos que luego fueron mejorados por la ley 388/97. Estos mecanismos deben ser aplicados por los municipios para la gestión del suelo, en forma tal que sea posible la intervención de las zonas urbanizables y no urbanizables</p>
Ley 02 de 1991	<p>Por la cual se modifica la Ley de Reforma Urbana, estableciendo que los municipios deben no sólo levantar sino tener actualizados los inventarios de las zonas que presenten altos riesgos para la localización de asentamientos humanos y que los alcaldes contarán con la colaboración de las entidades pertenecientes al Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres, para desarrollar las operaciones necesarias para eliminar el riesgo en los asentamientos localizados en dichas zonas.</p>
Ley 152 de 1994	<p>Por medio de la cual se establecen los procedimientos y mecanismos para la elaboración, aprobación, ejecución, seguimiento, evaluación y control de los planes de desarrollo tanto de la Nación y de las entidades territoriales como de los organismos públicos de todo orden, incluye en materia de planificación: la ratificación de la sustentabilidad ambiental como principio de actuación de las autoridades de planeación, enunciado en la Ley 99/93, y la necesidad de los planes de ordenamiento para los municipios.</p>
Ley 388 de 1997	<p>Ley de Desarrollo Territorial cuyos objetivos son en cuanto al riesgo, son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • “Establecimiento de los mecanismos que permitan al municipio, en ejercicio de su autonomía, entre otros, la prevención de localización de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo” • “Garantizar que la utilización del suelo por parte de sus propietarios se ajuste a la función social de la propiedad y permita hacer efectivos los derechos constitucionales a la vivienda, así como por la protección del medio ambiente y la prevención de desastres...” • “Función Pública del Urbanismo: Mejorar la seguridad de los asentamientos humanos ante los riesgos

Ley / Decreto	Obligaciones relacionadas con Prevención y Reducción de Riesgos y Ordenamiento Territorial
	<p>naturales"</p> <ul style="list-style-type: none"> • "Acción Urbanística: Determinar las zonas no urbanizables que presenten riesgos para localización de asentamientos humanos, por amenazas naturales, o que de otra forma presenten condiciones insalubres para la vivienda". • Localizar las áreas críticas de recuperación y control para la prevención de desastres..." <p>"En la elaboración y adopción de los planes de ordenamiento territorial de los municipios se deberá tener en cuenta, entre otros determinantes las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales".</p> <p>Art. 10. Determinantes de los POT. Numeral 1, literal C. Se relaciona con la conservación y protección del medio ambiente y la prevención de amenazas y riesgos naturales.</p>
Ley 812 de 2003	<p>Por el cual se estableció el Plan Nacional de Desarrollo - PND 2002 - 2006 "Hacia un Estado Comunitario", que en su capítulo III "Construir Equidad Social", programa de "Prevención y Mitigación de Desastres Naturales" determinó: 1) la profundización del conocimiento sobre riesgos naturales y su divulgación; 2) la inclusión de la prevención y mitigación de riesgos en la planificación y la inversión territorial y sectorial; y, 3) la reducción de la vulnerabilidad financiera del Gobierno ante desastres Decreto 879 de Por el cual se reglamentan las disposiciones referentes al ordenamiento 1998 del territorio municipal y distrital y a los Planes de Ordenamiento Territorial. Se tendrán en cuenta las prioridades del Plan de Desarrollo del municipio o distrito y los determinantes establecidos en normas de superior jerarquía entre las que se encuentra: Las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales.</p>
Decreto 2015 de 2001.	<p>Se reglamenta la expedición de licencias de urbanismo y construcción de 2001 con posterioridad a la declaración de situación de desastre o calamidad pública.</p>
Decreto 4002 de 2004.	<p>Por el cual se establece que teniendo en cuenta razones de excepcional de 2004 interés público, o de fuerza mayor o caso fortuito, el alcalde municipal o distrital podrá iniciar el proceso de revisión del plan, las cuáles serán: La declaratoria de desastre o calamidad pública y por los resultados de estudios técnicos detallados sobre amenazas, riesgos y vulnerabilidad que justifiquen la recalificación de áreas de riesgo no mitigable y otras condiciones de restricción diferentes a las inicialmente adoptadas en el POT.</p>
Normativa relacionada con Medio Ambiente	
Ley 99 de 1993	<p>Mediante el cual se organiza el Sistema Nacional Ambiental y se (Ley del Medio crea el Ministerio del Medio Ambiente. En ella se establece que la Ambiente) prevención de desastres será materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento.</p> <p>Según la ley, corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales:</p> <p>Ejercer la función de máxima autoridad ambiental en el área de su jurisdicción, participar en los procesos de planificación y ordenamiento territorial para que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten, realizar actividades de análisis, seguimiento, prevención y control de desastres en coordinación con las demás autoridades ambientales competentes, y asistirles en los aspectos medioambientales en la prevención y atención de emergencias y desastres. "Prestar asistencia técnica a entidades públicas y privadas y a los particulares, acerca del adecuado manejo de los recursos naturales renovables y la preservación del medio ambiente".</p>

Adicionalmente, es destacable que Colombia actualmente se encuentra en una transición conceptual y operativa desde un enfoque basado en el desastre a otro basado en el riesgo. El enfoque conceptual basado en el desastre tiene su expresión en el Decreto 919 de 1989 bajo la concepción de la prevención y atención de desastres como hechos cumplidos, donde la causa principal de los desastres recae en la dinámica natural. Mientras que el basado en el riesgo, está presente en la Ley 1523 de 2012, por medio de la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, que está dirigida hacia las prácticas y dinámicas sociales frente a los contextos ambientales (Cardona et al, 2014).

La transición de la noción de desastre a la de riesgos, pasa por la construcción concertada de un nuevo enfoque que deberá tener elementos nuevos y antiguos e incorporar elementos conceptuales claros, que en muchos casos están en desarrollo. Esto implica dejar atrás enfoques

verticales y centralistas para orientarse en enfoques participativos que estén basados en las posibilidades endógenas locales. (Federación Colombiana de Municipios, 2013)

El decreto más reciente es el 1807 de septiembre de 2014, que reglamenta el Artículo 189 de la Ley 19 de 2012 y es específico en cuanto a la necesidad de Incorporación de la Gestión del Riesgo en la Revisión de los Planes de Ordenamiento Territorial. En su texto aporta lo siguiente: con el fin de promover medidas para la sostenibilidad ambiental del territorio, sólo procederá la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo del plan de ordenamiento territorial o la expedición del nuevo plan de ordenamiento territorial cuando se garantice la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y la delimitación y zonificación de las áreas con condiciones de riesgo además de la determinación de las medidas específicas para su mitigación, la cual deberá incluirse en la cartografía correspondiente. En este artículo se destaca la falta actual de reglamentación en cuanto a metodologías de evaluación de amenazas y riesgo y se destaca la necesidad de buscar estándares, dado que hasta el momento, cada municipio ha adoptado la metodología que ha considerado oportuna o aquella disponible. Adicionalmente se dan lineamientos generales en este sentido y se recomiendan escalas de análisis e insumos mínimos necesarios.

1.3.3. Incorporación del riesgo en el Ordenamiento Territorial

Además del Ordenamiento Territorial, en el caso de ordenamiento ambiental y manejo de cuencas (POMCAs), también se han venido considerando los requisitos de incorporación de la gestión de riesgos. Igualmente, se destacan las mismas dificultades como la falta de estándares en cuanto a resolución, escalas, modelos a utilizar, para identificar las zonas en amenaza y riesgo. (Cardona et al; 2014)

En el sentido de hacer un uso racional del suelo, organismos internacionales como las agencias de la ONU y otras entidades multilaterales de desarrollo como el Banco Mundial o el Banco Interamericano de Desarrollo, también han indicado en varios documentos relacionados con planificación y gestión del riesgo, que evitar la ocupación de terrenos no apropiados para la urbanización por presencia de amenazas naturales, más que una restricción, constituye una oportunidad para el desarrollo local, ya que evita costosas inversiones que deben realizarse cuando se presentan los desastres.

Si se aplican estrategias de gestión del riesgo de desastres adecuadamente, se pueden tomar decisiones acertadas, conforme con las posibilidades reales del medio, evitando posteriores emergencias y desastres. Se trata de poder tomar las decisiones sensatas de adaptación de acuerdo con el contexto social y natural. (Cardona et al, 2014)

Las bondades del trabajo integrado de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial son innegables, y las implicaciones que esta conjunción tiene en la sostenibilidad, la calidad de vida y la seguridad de la población son evidentes. Sin embargo, puede verse equivocadamente la gestión del

riesgo como una carga administrativa adicional, un simple requisito sin sentido, como un problema o una restricción para desarrollo. Es importante aquí reiterar que se trata justamente de todo lo contrario; pues poder invertir los recursos sabiendo que el potencial de beneficio es el óptimo, conduce a tener la seguridad que se están tomando las mejores determinaciones.

Las autoridades municipales deben siempre preguntarse: ¿cuántos recursos se invierten anualmente en la atención recurrente de emergencias y desastres en el territorio?, ¿a cuántas de estas familias se les repite su situación año tras año?, ¿cuántos programas del plan de gobierno se ven afectados o se han visto afectados por que deben desviarse sus recursos para atender un deslizamiento, una inundación, una avalancha, entre otros? Además, ¿cuántas vidas se han perdido, cuántas familias se han quedado sin vivienda? Aunque evaluar lo que ha dejado de ocurrir resulte difícil, hay que intentar cuantificar mejor, ¿cuántas vidas se han salvado?, ¿cuántas ayudas no se han tenido que entregar?, o en términos de gestión y prevención ¿cuántas viviendas se han reubicado?, ¿en cuántos proyectos se ha incorporado la gestión del riesgo de manera apropiada? Seguramente las respuestas desde todo punto de vista serán positivas. Es importante para el tomador de decisiones y todo su grupo técnico reconocer que ambos procesos, tanto la gestión del riesgo como el ordenamiento territorial, son procesos de adaptación que tienen relación directa el uno con el otro, pues están basados en el conocimiento del territorio, sus posibilidades y sus restricciones; dando orientación a cómo debe ser el desarrollo en forma adecuada y con la posibilidad de mantenerse en el futuro. Lograr tener encadenados ambos procesos sirve para que el municipio opte por un mejor crecimiento, disminuyan sus emergencias o desastres y realmente pueda encaminarse hacia la inversión social y la competitividad. (Cardona et al; 2014)

Impedir la ocupación de terrenos no apropiados para la urbanización debido a la existencia de amenazas naturales o socio-naturales no es una simple restricción sino una oportunidad para el desarrollo local, ya que evita costosas inversiones que de una u otra manera los municipios debe asumir en el momento de presentarse un desastre. Identificar y zonificar de forma anticipada las zonas donde se puede generar riesgo es fundamental para determinar correctamente las áreas de expansión del municipio a fin de evitar desastres futuros. Así mismo en relación con el riesgo ya existente, la incorporación del riesgo en la planificación territorial es necesaria para determinar los tratamientos urbanísticos que se deberán implementar a fin de reducir el potencial de pérdidas de vidas y daños económicos en las zonas determinadas como de alto riesgo. (MAVDT, 2005). Sin embargo, el poder determinar las zonas de amenaza y riesgo, establecer los usos de suelo adecuado para el crecimiento e identificar los proyectos prioritarios del municipio, no son el único resultado de la gestión del riesgo en el territorio, también hay otros aspectos que hacen que sea atractivo para una administración aplicar todo el conjunto de estrategias que existen y que conducen a un mejor desarrollo. Al ejecutar, realizar y trabajar sobre las acciones encaminadas al control, disminución y preparación frente al riesgo. Se están reduciendo a su vez los impactos potenciales

devastadores de eventos ambientales peligrosos y las emergencias que de ellos se derivan en la localidad, lo cual a su vez está expresado en:

- Minimizar la pérdida de vidas como premisa fundamental del estado, igualmente se disminuyen las pérdidas económicas, sociales y culturales en la sociedad.
- Particularmente en la administración se reducen las inversiones en atención (humanitaria y materiales), ya que no se tendrán las mismas afectaciones recurrentes e históricas.
- La destinación de recursos podrá ser realmente priorizada en los programas sociales, culturales y comunitarios con una visión de oportunidad y necesidad de la población, y no se verán disminuidos u orientados a atender las consecuencias de eventos atípicos que desequilibren el erario municipal.
- Además llevará al municipio a un mejor escenario de competitividad.

De otro lado, incorporar la gestión del riesgo en todos los procesos de planeación (ordenamiento y plan de desarrollo) contribuye a encaminar todos los programas planteados hacia el mismo objetivo de desarrollo sostenible, entendido éste como el satisfacer las necesidades actuales sin disminuir las posibilidades de que las generaciones futuras satisfagan las suyas; dicho de otro modo, se deben utilizar los recursos de manera racional y equitativa.

Este tipo de planificación tiene una visión de balance entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental, bajo parámetros de inversión estratégica que se traduzcan en oportunidades para que el municipio avance y progrese. La inclusión de la gestión del riesgo, no sólo en el ordenamiento territorial sino también en toda la planificación local, se convierte en una estrategia y un instrumento idóneo que permite actuar sobre el territorio para prevenir desastres y reducir riesgos, y conduce al municipio a un desarrollo continuo, orientado a mejorar las condiciones de vida de la población.

En cuanto a tipos de amenaza a considerar en el proceso de ordenamiento territorial, hay tres especialmente relevantes en cuanto son determinantes para definir los usos que puede darse al suelo; se trata de los procesos de **remoción en masa, inundaciones y flujos de lodos**. Otros tipos de amenazas naturales, tales como la amenaza sísmica, son prescriptivos, es decir, no proporcionan condicionantes para la ocupación del territorio aunque sí unos requerimientos representados en códigos de construcción para el reforzamiento de estructuras. Ningún área está totalmente restringida en el caso sísmico, si bien existirán requisitos más estrictos en cuanto a diseño estructural para las zonas de amenaza sísmica más altas. (Cardona et al; 2014)

Teniendo en cuenta que el ordenamiento territorial se hace en función de los municipios, las amenazas a considerar deben tener implicaciones a esta escala. En el contexto andino son muy comunes las áreas urbanas desarrolladas en montañas, con lo cual cobran especial relevancia los

procesos que tienen relación con la topografía, como es el caso de la remoción en masa y las inundaciones.

La evaluación de la amenaza por inundación, por su parte, presenta una particularidad relacionada con la escala de trabajo: tiene un carácter más regional y debe analizarse en el contexto de cada cuenca y cada río particular y no obedece a una escala específica; siendo competencia posiblemente de procesos de ordenamiento ambiental a escalas más amplias, del orden regional, y en el caso de cuencas mayores, incluso a escala nacional.

En esta investigación se hace énfasis al análisis del entorno urbano y se estudia la amenaza que a juicio del autor representa un claro determinante para el ordenamiento territorial a esta escala: los Procesos de Remoción en Masa (PRM).

Los PRM constituyen un peligro geomorfológico de origen natural o inducido, que debe tenerse en cuenta en la planificación del territorio, sobre todo en áreas de montaña. Estas zonas son muy susceptibles a presentar estos procesos, debido a que generalmente reúnen varios elementos que condicionan su ocurrencia. Aunque la percepción de este tipo de procesos naturales es baja en comparación con las inundaciones, la amenaza volcánica o los terremotos, actualmente los PRM son causantes de desastres materiales y pérdida de vidas humanas en todo el mundo. Esto no implica que los peligros vayan en aumento, sino que cada vez es más común que las zonas urbanas se extiendan hacia áreas montañosas potencialmente inestables.

1.4. PRM y ordenamiento del territorio

Las amenazas geomorfológicas son el resultado de cambios súbitos en el comportamiento de la superficie de la tierra a largo plazo causado por cambios en las condiciones iniciales. En este sentido, pueden clasificarse como endógenas (vulcanismo y neotectónica), exógenas (inundaciones, colapso kárstico, avalanchas de nieve, erosión de canales, sedimentación, movimientos en masa, tsunamis, erosión costera), y aquellas inducidas por el clima y cambios de usos del suelo (desertificación, permafrost, degradación, erosión del suelo, salinización e inundaciones).

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, la cual va modificándose a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones de equilibrio. En este contexto, los PRM pueden entenderse como los reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones.

Las fuerzas gravitacionales y la infiltración tienden a causar inestabilidad en las laderas naturales, en pendientes producto de excavaciones o terraplenes. Los deslizamientos, o en un sentido más amplio, movimientos en masa, son un fenómeno del proceso de denudación, donde el suelo o material rocoso es desplazado a lo largo de pendientes, especialmente a causa de la fuerza gravitacional. El fenómeno ocurre cuando el esfuerzo cortante del material de la ladera se hace

menor que el esfuerzo cortante actuando sobre ella, produciendo una falla a través de una superficie.

El término deslizamiento fue definido por Varnes and IAEG (1984) como casi todas las variedades de los movimientos de masas en las laderas, entre ellos algunos como la caída de rocas, desprendimientos y flujos de escombros que involucran pequeños o ningún deslizamiento como tal. Posteriormente, se estableció una definición similar y más aceptada considerando un deslizamiento como el movimiento de una masa de roca, tierra o escombros hacia abajo en una ladera (Cruden, 1991). El Anexo B presenta una revisión detallada de la nomenclatura, diferentes definiciones y conceptos en torno al tema de PRM.

Una de las motivaciones para generar conceptos estándar sobre deslizamientos viene de la idea de producir un Inventario de Deslizamientos Mundial (WLI). Para respaldar este propósito, se produjeron una serie de publicaciones por parte de la Comisión de Deslizamientos de la IAEG, la UNESCO working Party On World Landslide Inventory, y después el grupo de trabajo en deslizamientos de IUGS. En tales publicaciones se pudo llegar a cierto nivel de estandarización en campos relacionados con deslizamientos, incluyendo: nomenclatura de deslizamientos (IAEG. Commission on Landslides, 1990; UNESCO-WP/WLI, 1993a), actividad de deslizamientos (UNESCO-WP/WLI, 1993b), causas de deslizamientos (UNESCO-WP/WLI, 1994), velocidad de deslizamientos (IUGS-Working group on landslide, 1995) y medidas a tomar para remediarlos (IUGS-Working group on landslide, 2001; Popescu, 2002).

Recientemente, las tres sociedades geológicas ISSMGE, ISRM y IAEG han creado el Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (JTC-1), que continúa trabajando por la estandarización y difusión de la nomenclatura del tema entre las diferentes disciplinas. Si bien hay cierto acuerdo en nomenclatura, actividades, causas, movimiento y medidas de remedio, también es cierto que se mantienen muchas incertidumbres concernientes a la metodología para mapear y modelar amenaza, vulnerabilidad y riesgo por deslizamiento. El primer conjunto de definiciones propuesto, relacionado con amenaza y riesgo fue publicado por Varnes and IAEG (1984) y se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Definiciones para Evaluación de Amenaza y Riesgo (Varnes y IAEG, 1984)

Término	Definición
Amenaza Natural (Hazard, H)	Probabilidad de ocurrencia en un período de tiempo específico y en un área dada de un fenómeno potencialmente peligroso
Vulnerabilidad (Vulnerability, V)	Grado de pérdida de un elemento en riesgo dado, resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada. Se expresa en una escala de 0 o sin daño a 1 o pérdida total.
Riesgo Específico (Specific Risk, Rs)	Grado de pérdida esperado debido a un fenómeno natural, puede expresarse como el producto de H veces V.
Elementos en Riesgo (E)	Población, propiedades, actividades económicas, incluyendo servicios públicos, etc en riesgo, en un área dada.
Riesgo Total (Rt)	Número esperado de muertes, personas heridas, daño a la propiedad, o interrupción de la actividad económica, debido a

	un particular fenómeno natural, expresado como el producto de riesgo específico por elementos en riesgo $R_t = (E)(R_s) = (E)(H \times V)$
--	---

Desde la publicación de estas definiciones, se han desarrollado muchas aplicaciones (Einstein, 1988; Fell, 1994; Soeters and van Westen, 1996; Wu et al., 1996; Cruden and Fell, 1997; van Westen et al., 2003; Lee and Jones, 2004; Glade et al., 2005), lo cual hace pensar que a día de hoy, siguen siendo ampliamente aceptadas. También concuerdan con las definiciones de términos utilizadas por las Naciones Unidas y reconocidas internacionalmente para amenaza, vulnerabilidad, riesgo y desastres (ISDR, 2009).

Por otro lado, la evaluación de riesgo por deslizamientos es parte de un proceso enmarcado en la gestión del riesgo, incluida dentro de los programas de reducción de riesgo de desastre. En este campo de trabajo, son comunes las definiciones contenidas en la Tabla 4.

Tabla 4. Definiciones para gestión de riesgo por deslizamiento (IUGS, 1997)

Término	Definición
Estimación del Riesgo	Es el proceso usado para medir el nivel de riesgo ambiental que está siendo analizado. Contiene los siguientes pasos: análisis de frecuencias, análisis de consecuencias y su integración.
Análisis del Riesgo	Es el uso de información disponible para estimar el riesgo a individuos, poblaciones, propiedades o el ambiente, frente a amenazas. Los análisis de riesgos generalmente contienen los siguientes pasos: definición de metas, identificación de amenaza y estimación del riesgo.
Evaluación del Riesgo	Es la etapa en la cual los valores y juicios entran en el proceso de decisión, explícita o implícitamente, al incluir la consideración de la importancia del riesgo estimado y las consecuencias en el campo social, ambiental y económico asociadas, para identificar el rango de alternativas para gestionar el riesgo.
Valoración del Riesgo	Es el proceso de análisis y valoración del riesgo
Control del Riesgo o Tratamiento del Riesgo	Es el proceso de toma de decisiones para gestión del riesgo, y la implementación o reforzamiento de medidas de mitigación y la evaluación de su efectividad, usando los resultados de la valoración de riesgo como entrada
Gestión del riesgo	El proceso completo de valoración y control de riesgo (o tratamiento del riesgo)
Riesgo Individual	El riesgo de resultar muerto o herido algún individuo identificable que viva en la zona impactada por el deslizamiento, o que siga un patrón de vida por el que pueda estar sujeto a las consecuencias del deslizamiento.
Riesgo Social	El riesgo de múltiples muertes o heridos en la sociedad como un todo.
Riesgo Aceptable	El nivel de riesgo que es posible aceptar sin tomar medidas para su gestión. La sociedad generalmente no considera gastar en reducir estos riesgos.
Riesgo Tolerable	El riesgo con el que la sociedad está dispuesta a vivir, con la confianza que está siendo controlado adecuadamente, revisado y reducido cuando sea posible.

1.4.1. Remoción en Masa

Los deslizamientos son considerados el tercer tipo de desastre natural en términos de su importancia mundial (Zillman, 1999). Los deslizamientos de laderas individuales generalmente no

son tan espectaculares o costosos como otros eventos como terremotos, inundaciones mayores, huracanes u otras catástrofes. Se suelen presentar repartidos en áreas extensas, y a lo largo de años pueden causar más daño a propiedades que cualquier otra amenaza geológica (Varnes and IAEG, 1984). Mucho del daño asociado a terremotos y eventos meteorológicos es causado por deslizamientos, sin embargo, estos daños en las bases de datos internacionales se atribuyen al evento principal, lo que lleva a una subestimación del impacto de los deslizamientos en las bases de datos y estadísticas.

Los deslizamientos de tierra son un fenómeno natural recurrente y son parte integral del ciclo geológico/geomorfológico de desarrollo del paisaje (o formación de tierras) a través del desarrollo secuencial de pendientes en regiones elevadas, especialmente en cadenas montañosas jóvenes (Singh 2010).

Es bien conocido que los deslizamientos y movimientos en masa presentan algunos atributos relacionados con la acción antrópica, bien sea en la generación o aceleración de los procesos. El estudio de este fenómeno ha enfocado la atención de investigadores de todo el mundo, principalmente por el incremento de los impactos socio-económicos generados y el aumento de la presión de la urbanización en entornos montañosos (Aleotti and Chowdhury 1999). La presión poblacional se está incrementando, y la tendencia es a la urbanización de laderas, ya sea en países desarrollados por su atractivo paisajístico, o en países en vías de desarrollo, por dinámicas socio-espaciales propias o prácticas de urbanización sin planificación (Schuster and Highland 2007).

El rango del fenómeno de deslizamientos es demasiado amplio, siendo una de las amenazas naturales de mayor complejidad y diversidad que pueden encontrarse. Guzzetti (2005) sugiere un espectro que sintetiza sus diferentes dimensiones y los órdenes relacionados (

Figura 4). Pueden ocurrir en todos los continentes e incluso en los océanos. El área de un deslizamiento puede ocupar nueve órdenes de magnitud, desde los pequeños y localizados, de pocos metros cuadrados, hasta aquellos enormes deslizamientos submarinos de varios cientos de kilómetros cuadrados de extensión. El volumen deslizado puede ocupar dieciséis órdenes de magnitud, desde pequeños desprendimientos de roca hasta gigantescos deslizamientos submarinos. La velocidad de los movimientos en masa ocupa catorce órdenes, desde movimientos de pocos milímetros al año, hasta avalanchas de roca viajando a cientos de kilómetros por hora. Pueden ocurrir aislados o en grupos, incluso de varios cientos; los deslizamientos múltiples ocurren cuando son detonados por otros procesos como terremotos o lluvias intensas o prolongadas. El tiempo de vida de un deslizamiento puede ir desde unos pocos segundos en el caso de desprendimientos de rocas, hasta cientos o incluso miles de años en el caso de deslizamientos durmientes

La extraordinaria amplitud del espectro del fenómeno de deslizamientos hace difícil, si no imposible, definir una simple metodología para identificar y mapear deslizamientos, determinar amenaza y evaluar el riesgo asociado.

Debido a las incertidumbres en adquisición de datos y en la modelización y calibración del fenómeno, y a la complejidad y vulnerabilidad de las sociedades contemporáneas, la zonificación de deslizamientos, o de susceptibilidad, amenaza o riesgo asociado, puede estar fuera del alcance del enfoque tradicional científico (tipo puzle), basada en experimentos controlados y la generalización y consenso entre expertos. La solución a este tipo de problemas debe venir de una nueva práctica científica, capaz de enfrentarse a amplias incertidumbres, juicios de expertos variados, y acciones sociales derivadas de evaluaciones de amenaza y riesgo (Guzzetti et al. 1999)

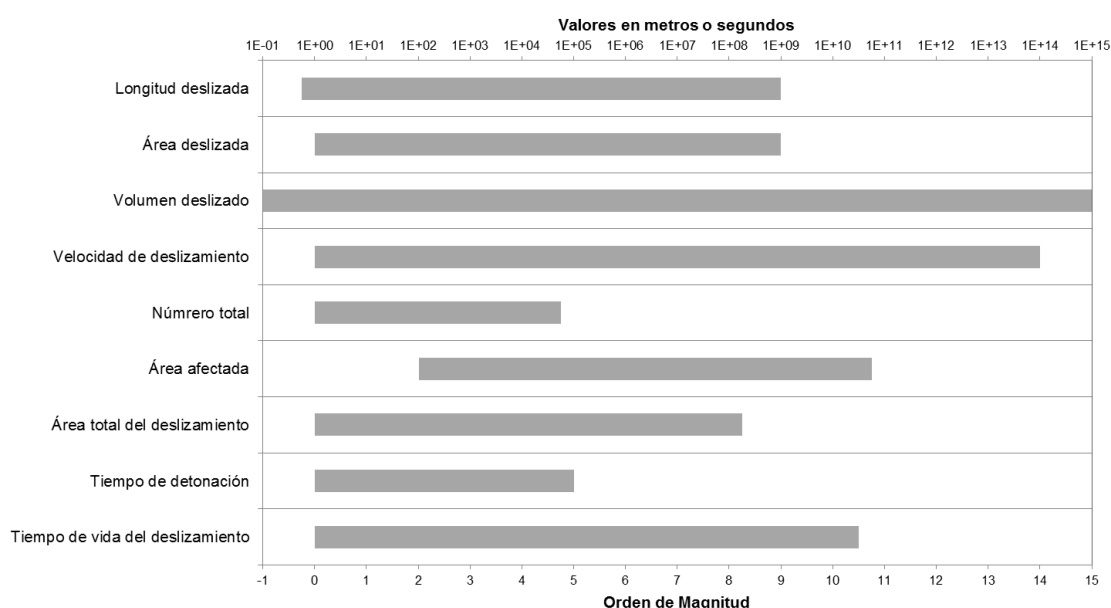


Figura 4. Espectro del fenómeno de deslizamiento
El eje horizontal muestra el orden de magnitud (eje inferior) y sus cifras (eje superior).
Todas las unidades en metros (o sus potencias) y segundos. Fuente: (Guzzetti 2005)

El impacto de los deslizamientos puede reducirse considerablemente si las zonas susceptibles se identifican y se señalan, y esto se acompaña de medidas de ordenación de territorio, estableciendo usos del suelo. En este contexto, se requiere incrementar los esfuerzos para hacer posible la zonificación de deslizamientos, evaluación de susceptibilidad y amenaza para la determinación del riesgo, mejor documentado y reproducible, y buscar mecanismos para transmitir la información científica generada, asociada a las normas de planificación, códigos de construcción y planes de defensa civil. Una de las etapas más importantes en la gestión de deslizamientos es la zonificación del área bajo amenaza, la evaluación de vulnerabilidad y de riesgo.

1.4.2. Zonificación de amenaza y riesgo para el OT

Durante las últimas cuatro décadas, muchos investigadores han contribuido al conocimiento del fenómeno con varios tipos de modelos de predicción de deslizamientos. A pesar de que los estudios localizados en eventos individuales pueden proveer información en profundidad, la investigación basada en la distribución espacial de deslizamientos es esencial si el fenómeno se distribuye en un área amplia. El trabajo inicial consistió en mapas de inventarios de deslizamientos y mapas cualitativos basados en reglas de expertos subjetivas. El desarrollo gradual de las investigaciones y el auge de los computadores personales, hizo posible la aplicación de técnicas complejas cuantitativas de tipo estadístico como análisis bivariados, multivariados y análisis determinísticos para establecer relaciones entre factores causales y la distribución espacial de deslizamientos. En este aspecto, el análisis de todas las variables del terreno en relación con la distribución espacial se ha visto beneficiada enormemente por la introducción de los Sistemas de Información Geográfica, la herramienta ideal para el análisis de parámetros con alto grado de variabilidad espacial (van Westen, 2000).

Hasta ahora, se han probado, validado y mejorado a nivel local muchos modelos estáticos o dinámicos, basados en diferentes enfoques, en varias partes del mundo (ver Sección 1.4). A pesar de ello, varios problemas siguen sin resolverse, impidiendo una predicción exacta de amenaza de deslizamiento, especialmente cuando se trata de un pronóstico en tiempo real. Esto se debe principalmente a la complejidad del proceso, que envuelve combinaciones críticas de factores causativos muy heterogéneos, y a la incertidumbre asociada con la predicción de factores detonantes. Los factores causativos pueden ser de diversos tipos, algunos conocidos, medibles cualitativa o cuantitativamente y factibles de analizar estadísticamente. Algunos permanecen desconocidos. De esta manera, siguen siendo necesarios más estudios con diferentes combinaciones de factores en metodologías analíticas modernas para llegar a modelos apropiados en cuanto a métricas adecuadas a los diferentes contextos.

La experiencia en muchos países estimula el uso de mapas de zonificación de amenaza y riesgo para el ordenamiento territorial y la gestión de emergencias (Cascini et al., 2005) y reafirma la necesidad de buscar métodos estándar y reproducibles para la evaluación y zonificación de amenaza, especialmente en cuanto tiene que ver con definición de clases de amenaza, para que los estudios realizados puedan ser comparables.

La realidad es que los mapas producidos no son homogéneos entre diferentes países, diferentes instituciones del mismo país, o incluso dentro de una misma institución. En muchos casos la terminología empleada no es uniforme, y frecuentemente las leyendas de los mapas no van acompañadas de definiciones que faciliten su uso. Como respuesta a esta necesidad, entre otros

objetivos, el Proyecto Multinacional Andino constituyó el Grupo de Estándares para Movimientos en Masa GEMMA, para estudiar la problemática en los países andinos y sus entidades relacionadas.

Los esfuerzos de la comunidad internacional están orientados hacia la búsqueda de análisis cada vez más cuantitativos, como de mapas que sean comparables con otros mapas de riesgo, o el análisis de criterios de riesgo tolerable (GEMMA, 2007).

El documento Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía Para Evaluación de Amenazas (GEMMA, 2007), distingue seis tipos de caso como se presenta en la Tabla 5:

Tabla 5. Tipos de zonificación posible para procesos de remoción en masa

Caso	Descripción
A	Evaluación de la estabilidad de un talud o pendiente individual
B	Zonificación de la amenaza por un movimiento en masa individual ya existente
C	Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa
D	Zonificación de amenaza para la definición de líneas de retiro
E	Zonificación de amenazas en el área de propagación (alcance), basándose en el análisis de depósitos
F	Zonificación de amenazas en el área de la propagación, basada en el análisis de la fuente de materiales

La complejidad de los procesos de movimientos en masa requiere que para su análisis y representación sea necesario considerar tanto sus características espaciales como las temporales, conservando en mente que el objetivo último de la evaluación y representación de la amenaza, es el análisis de riesgo para la gestión de emergencias o el ordenamiento territorial.

Para áreas densamente pobladas, se requiere la preparación de mapas de amenaza en escala intermedia (1:25000) con el fin de delimitar las diferentes zonas de alcance y representar los niveles de intensidad del proceso con criterios más precisos (GEMMA, 2007).

Al finalizar y representar el impacto de los movimientos en masa en un área determinada, debe hacerse una distinción cuidadosa entre los mapas de amenaza y los mapas de riesgo. El propósito de los mapas de zonificación de amenaza es dividir el área de interés en unidades homogéneas en las cuales el grado de amenaza sea semejante. Estos mapas deben presentarse a escala y simbología adecuada con el fin de que sean aplicables para el ordenamiento territorial, la gestión de riesgos y la prevención de desastres. Por su parte, los mapas de riesgo, como lo describen Cascini et al (2005), no tienen como objetivo su aplicación directa en planificación o desarrollo urbano ya que estos generalmente reflejan la situación actual respecto al potencial de daño pero no la distribución espacial de la amenaza, de manera que, por ejemplo, las zonas no urbanizadas con frecuencia se representan como de bajo riesgo, independiente del nivel de amenaza existente (GEMMA, 2007). Por este motivo es fundamental separar los conceptos de amenaza y riesgo para fines de ordenamiento.

El estudio y mapeo de la amenaza por movimientos en masa es una ciencia que requiere la consideración de muchas variables. La metodología a emplear depende del tipo de problema y por

lo tanto, con excepción de algunos aspectos, no es práctico establecer un único procedimiento o metodología estándar para todos los tipos de problema (Hungar, 2004, GEMMA, 2007).

Adicionalmente, las metodologías a utilizar son sensibles al contexto y a la escala de trabajo, razón por la cual deben revisarse los diversos métodos de análisis y evaluación de susceptibilidad, amenaza y riesgo por deslizamientos, para ser adaptados y aplicados a los entornos urbanos andinos, objeto de estudio de esta tesis.

1.4.3. Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo por deslizamiento

El objetivo de la predicción es anticipar la presencia (ocurrencia) de un fenómeno peligroso y evaluar su potencialidad. En el caso de los movimientos en masa, el “peligro” se expresa normalmente en forma cartográfica, clasificando el territorio en función de su mayor o menor predisposición a exhibir roturas (mapas de susceptibilidad y peligrosidad). En un primer momento, el análisis de estabilidad de laderas se intentó abordar a nivel local con modelos deterministas. Sin embargo, la gran variabilidad de los parámetros geotécnicos y de flujo de agua subterránea a nivel regional, los hacía inviables en la práctica. La preparación de estos mapas es pues un ejercicio con numerosas incertidumbres. A pesar de ello, en los últimos años se han producido avances significativos en este campo. La evaluación del peligro que supone la rotura de una ladera debe dar respuesta a diversos interrogantes, entre ellos: ¿qué tipo de rotura puede ocurrir?, ¿dónde se producirá?, ¿hasta dónde llegará?, ¿cuándo tendrá lugar? (Corominas et al, 2014).

La determinación de las áreas propensas a producir roturas de las laderas o de ser alcanzadas por las mismas, se conoce como análisis de la susceptibilidad. El grado de susceptibilidad del terreno viene determinado por factores intrínsecos del terreno (geometría de la ladera, resistencia de los materiales geológicos, uso del suelo, etc). En los deslizamientos y desprendimientos, la identificación del punto inicial de rotura es clave. La capacidad de propagación del movimiento depende de la energía potencial así como de las características del recorrido. Existen diversos métodos para determinar áreas potencialmente inestables.

Los mapas constituyen una herramienta efectiva para presentar la información referente a la peligrosidad y riesgo de una zona o región y deben ser usados por planificadores, arquitectos, ingenieros, científicos o técnicos encargados de las labores de planificación y emergencia. Los mapas de procesos de remoción en masa tienen por finalidad, además de asegurar el correcto uso del territorio y prevenir los riesgos, servir de base para los estudios a detalle relacionados con el diseño y construcción de obras de ingeniería.

Los mapas cualitativos de susceptibilidad (alta, media, baja) son probablemente los más comunes, pero son útiles solo para tomar decisiones relativas tales como una selección aproximada de sitios (GEMMA, 2007).

En su concepto ideal, la susceptibilidad a movimientos en masa se puede considerar como una función distribuida espacialmente, definida como “la densidad de movimiento en masa esperada”, la cual es media en términos de ocurrencias anuales por km² o por unidad de área para movimientos pequeños. Un ejemplo de cómo se podría expresar es “25 deslizamientos/km² en 1997”. Puede expresarse también en m² de terreno potencialmente inestable por km² de área anual; ej: 1000 m²/km² de área inestable en 1997 (GEMMA, 2007). Para cada tipo de movimiento en masa, debe prepararse un mapa de susceptibilidad en forma separada, ya que por su naturaleza, la amenaza que puede representar es diferente en cada caso (GEMMA, 2007).

1.4.4. Métodos de zonificación

Para obtener mapas de susceptibilidad y amenaza relativa por deslizamiento, pueden mencionarse métodos basados en procesos físicos (de tipo determinista), modelos de susceptibilidad de tipo simplificado y heurístico, y modelos de tipo probabilista y estadístico.

La Tabla 6 muestra los diversos tipos de mapas posibles. Cada mapa se obtiene a partir de la información contenida en los anteriores y del conocimiento y análisis de nuevos datos, de tal forma que para preparar mapas de riesgo son necesarios los de amenaza, y para éstos son necesarios los de susceptibilidad.

Tabla 6. Diversos tipos de mapas por procesos de remoción en masa

Tipo de mapa	Contenido	Metodología
Inventario	Localización y distribución espacial de los procesos actuales y pasados. Características de los procesos (tipo, magnitud, velocidad, frecuencia)	Recopilación de datos. Estudio de la litología y características de los procesos.
Susceptibilidad	Zonas con diferente grado de potencialidad para la ocurrencia de uno o varios tipos de procesos.	Análisis del proceso. Análisis de los factores condicionantes Superposición de factores
Peligrosidad/Amenaza	Zonas con diferente grado de peligrosidad	Análisis de los factores desencadenantes Predicción espacial y temporal de la ocurrencia de los procesos.
Vulnerabilidad	Localización espacial de los elementos o zonas con diferente grado de vulnerabilidad.	Identificación de los elementos expuestos Evaluación de su vulnerabilidad
Riesgo	Zonificación del territorio con base en el grado estimado de riesgo	Evaluación de pérdidas debidas a un proceso determinado
Multirriesgo	Zonificación del territorio con base en el grado estimado de riesgo	Evaluación global de pérdidas causadas por diferentes procesos

1.4.4.1. Mapas de inventarios

Un mapa de inventario de deslizamientos muestra el tipo de actividad de los PRM, su distribución espacial, el tipo de proceso así como sus características. Es importante separar el tipo de proceso, ya que permite identificar las condiciones del terreno que le dieron lugar y porque su impacto es diferente dependiendo del mecanismo del movimiento. Los mapas de inventarios se realizan a partir de la recopilación de datos tales como documentos y reportes históricos, del análisis de mapas, fotos aéreas, imágenes de satélite y ortofotos así como del mapeo directo en campo. Los mapas inventario se realizan a escalas regionales o pequeñas (1:100 000 y menores),

aunque para determinados tipos de procesos, como los deslizamientos y hundimientos, se realizan mapas inventario a escalas mayores que recogen los rasgos y características de los movimientos. Existen diversos tipos de análisis que se pueden realizar a partir de un mapa de inventarios (Soeters y Van Westen, 1996; Van Westen, 1994).

1.4.4.2. Análisis de distribución de PRM

Este análisis es la manera más directa de acercarse al problema de los procesos de remoción en masa. Se genera un Mapa de Inventarios, ya sea basado en fotointerpretación, trabajo de campo o en datos históricos de la ocurrencia de procesos en el área. Este análisis es concebido como una representación elemental de un mapa de peligros ya que muestra la ubicación y el tipo de proceso. No dan información acerca de los cambios temporales de su distribución y desarrollo, además de que representan la información para un periodo muy corto. Este análisis es adecuado para escalas medias y grandes. A escala regional este mapa consume mucho tiempo pero resulta necesario para otro tipo de análisis, aunque se pueden realizar los mapas de inventarios con menor detalle. El uso de los sistemas de información geográfica es para almacenar información referente a cada proceso (ya sea como punto o polígono), para mostrar diferentes capas (procesos activos o antiguos, escarpes, minas).

1.4.4.3. Análisis de actividad de PRM

Es un refinamiento del anterior y está basado en la interpretación de fotos multitemporales, con el fin de mostrar la actividad de los procesos. El rango de tiempo usualmente es de 5 a 20 años, dependiendo de la información disponible y del grado de profundidad deseado. Este tipo de análisis es apropiado para escalas medias y grandes. Su desventaja es que consume mucho tiempo, hay incertidumbre respecto a las características de los PRM antiguos y depende de la habilidad del especialista.

1.4.4.4. Análisis de densidad de PRM

El análisis de la distribución de los PRM también se puede mostrar mediante un mapa de densidad, el cual muestra el porcentaje de deslizamientos por unidad de área que tiene cada unidad del terreno. Las unidades del terreno pueden ser unidades geomorfológicas, geológicas o ser determinadas mediante un método de separación de unidades del terreno (por ejemplo el del ITC de Holanda: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation). Para la entrada de datos se requiere un mapa de distribución de PRM y un mapa de unidades de suelo; es importante la experiencia por parte del individuo para la combinación de parámetros individuales, en combinación con otros mapas de parámetros. La aplicación de los SIG consiste básicamente en: 1) elaboración del mapa de bits (presencia/ausencia de PRM) de un determinado mecanismo de movimiento, 2) combinación del mapa temático seleccionado con el mapa de bits a través de una sobreposición y 3) cálculo del porcentaje de área afectada para cada variable evaluada.

1.4.4.5. Mapas de susceptibilidad

El principio expresado según Varnes (1984) afirma que “el estudio del pasado y del presente es la clave de lo que puede ocurrir en el futuro”. En deslizamientos significa que las roturas que pueden ocurrir en un futuro probablemente lo hagan en las mismas condiciones que las de los deslizamientos antiguos o actuales. El principio se aplica al estudio de los deslizamientos, siempre y cuando las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas no varíen. Los mapas de susceptibilidad pueden realizarse mediante el análisis de factores condicionantes o causales.

Los factores determinan las áreas en que confluyen determinados procesos en una determinada zona o región y se asume que aunque estos no se hayan presentado en la actualidad, pueden presentarse en el futuro. En este caso la metodología se basa en la preparación de mapas temáticos de los factores condicionantes y en la superposición de los mismos, estableciéndose el grado de susceptibilidad en función del peso asignado a cada uno de los factores. Estos mapas generalmente se preparan utilizando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y suelen realizarse a escalas medias (1:25 000 a 1:100 000), dependiendo del tipo de proceso, número de factores que lo condicionan y su complejidad, datos disponibles, etc. Para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los PRM existen diversas aproximaciones basadas la mayor parte de ellas, en la determinación de los factores que influyen en la aparición de roturas. En general se distinguen cuatro principales métodos utilizados en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad del terreno a producir roturas de las laderas (Van Westen, 1994; Soeters y Van Westen, 1996): 1) determinísticos, 2) heurísticos, 3) estadístico-probabilísticos y 4) geomorfológicos, como se condensa en la Tabla 7.

Tabla 7. Descripción de los diferentes tipos de análisis

Tipo de análisis	Característica principal
Distribución de procesos	Mapeo directo de los rasgos asociados a los procesos. El mapa generado muestra información de los sitios donde han ocurrido procesos de remoción.
Cualitativo	Es un método directo o semidirecto. A partir de un mapa geomorfológico y de la experiencia del investigador, se llega a un mapa de zonificación; o bien, se basa en la combinación de mapas temáticos (por ejemplo, pendiente, litología, forma de la ladera) usando algún SIG y mediante reglas de decisión basadas en el criterio del investigador.
Estadístico	En un método indirecto que se basa en análisis estadístico para estimar zonas donde pueden ocurrir procesos.
Determinístico	Es un método indirecto basado en la combinación de mapas y el cálculo de la estabilidad de las laderas.
Frecuencia de procesos	En este método indirecto, los registros de precipitación, sismicidad o modelos hidrológicos, se correlacionan con los datos de los procesos de remoción para obtener límites de estas variables

1.4.4.6. Métodos determinísticos

Se utilizan para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud específico, Se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos, teniendo una base física, lo que representa una gran ventaja respecto a otros métodos. Los datos de entrada se derivan de ensayos de laboratorio y/o de campo, a partir de estimaciones de resistencia o bien usando clasificaciones geomecánicas y se utilizan para determinar el factor de seguridad.

La Tabla 8 presenta los principales métodos y referencias de modelos basados en principios físicos.

Tabla 8. Métodos basados en principios físicos (Corominas et al, 2014)

Tipo	Método	Referencias
Métodos GIS basados en equilibrio límite	Modelos estáticos de talud infinito	Pack et al (1998), Dietrich et al (1995)
	Modelos dinámicos de talud infinito con lluvia como detonante	Baum et al (2002), van Beek (2002), Casadei et al (2003), Simoni et al (2008)
	Métodos de talud infinito para deslizamientos inducidos por sismo (Newmark)	Jibson et al (1998), Wang and Lin (2010)
Análisis cinemáticos para caída de rocas	Stereonet plots, análisis de discontinuidades basado en GIS	Gunther (2003)
Métodos de equilibrio límite 2D	2D LEM con análisis de flujo de agua y esfuerzos	GEO-SLOPE (2011)
Métodos de equilibrio límite 3D	Análisis de estabilidad de laderas en 3D	Hungr (1995), Gitirana et al (2008)
Modelos numéricos	Modelación continua	Hoek et al (1993), Stead et al (2001)
	Modelación discontinua	Hart (1993), Stead et al (2001).

Estos métodos se basan en la modelación de procesos de remoción en masa. Se pueden aplicar sobre grandes áreas solo cuando las condiciones geológicas y geomorfológicas son homogéneas y los tipos de deslizamiento son simples. La mayoría de métodos aplicados a escala local usan el modelo de talud infinito y por tanto son útiles sólo para deslizamientos superficiales.

1.4.4.7. Métodos heurísticos

Estos métodos se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de investigación. Los factores son ordenados y ponderados según su importancia esperada en la formación de PRM (Moreiras, 2005). Su principal desventaja radica en que el conocimiento de los factores ambientales, geológicos y morfológicos puede ser inadecuado y subjetivo, por lo que depende de la experiencia del experto.

Una aplicación de estas técnicas la hace Nilsen et al. (1979) en sus cartografías de susceptibilidad de la bahía de San Francisco, mediante la combinación de tres tipos de información. En primer lugar solaparon el mapa de pendientes con el inventario de deslizamientos. Analizando la densidad de movimientos determinaron las pendientes críticas de las laderas. Finalmente, la superposición del mapa obtenido con el mapa litológico, permitió relacionar cada litología con su pendiente crítica. Una variación de esta métrica es el método de la matriz (Irigaray et al. 1997). Consiste en la obtención de un índice cuantitativo que expresa la inestabilidad potencial relativa de una región. Para obtenerlo, se seleccionan un conjunto de factores relacionados con la aparición de movimientos de ladera. Con estos factores se construye una matriz, de modo que cada una de sus celdas representa cada una de las combinaciones posibles de los factores. A partir del inventario de movimientos de ladera, se determina porcentaje de área afectada por movimientos que corresponde a cada combinación de factores (matriz de susceptibilidad). Todas las combinaciones de factores que no están asociadas a la presencia de movimientos obtendrán un valor "0" en la

matriz de susceptibilidad, el resto tendrán un valor superior a “0”, pudiendo alcanzar el valor de “100” para el caso extremo en el que toda el área de una determinada combinación de factores presenta roturas.

1.4.4.8. Métodos probabilísticos y estadísticos

Se basan en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actual y pasada. Son útiles cuando se dispone de información, tanto cualitativa como cuantitativa. Los modelos estadísticos aplicables pueden ser univariantes o multivariantes y la eficacia de estos métodos depende de la calidad y cantidad de los datos adquiridos. La principal ventaja es la objetividad del método, ya que diferentes investigadores pueden obtener resultados semejantes si se aplican las mismas técnicas; la desventaja consiste en el costo y en la dificultad para obtener información referente a los factores que controlan la inestabilidad.

Los métodos estadísticos univariantes se dividen en dos grupos: los que utilizan el análisis condicional y los que no lo utilizan. El análisis condicional se basa en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de PRM, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de PRM. La información se integra y analiza usando la técnica de las funciones de favorabilidad (Chung y Fabri, 2005). Otros modelos que no están basados en las funciones de favorabilidad son el de combinación de factores (Brabb et.al., 1972) o el método de la matriz (Irigaray et. al., 1999). Brabb (1972) presentó un método de análisis de susceptibilidad de laderas en una escala regional en el cual tomó en cuenta la ocurrencia, sustratos, tipo de material y ángulo de la pendiente. Se agrupan las unidades geológicas para la densidad de deslizamientos y se determinan los valores de susceptibilidad. Para este método es adecuado usar una escala media pues el trabajo no es detallado. El análisis consiste en la presencia o la ausencia de deslizamientos en cierta área y unidad de suelo y se compara con el mapa de densidad de deslizamientos.

La estadística multivariada busca los factores más importantes que se relacionan o intervienen para la ocurrencia de los deslizamientos. Las técnicas más usadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante. La regresión múltiple considera una única población y varios grupos de variables; además determina la influencia de un grupo de variables independientes sobre una o más variables dependientes. En cambio, el análisis discriminante permite separar varias poblaciones de una misma muestra caracterizadas por las mismas variables a partir de la función discriminante.

Si se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, pueden aplicarse los métodos estadísticos. Se basan en la identificación y ponderación de cada factor a través de las relaciones observadas entre el mismo y la distribución de los movimientos de masa (recientes y antiguos).

Entre los métodos más conocidos están los modelos multivariantes. Estos analizan la interacción y dependencia de un conjunto de factores concurrentes, sobre la generación de deslizamientos. Los métodos más utilizados son la regresión múltiple y análisis discriminante (Jones et al., 1961; Neuland, 1976; Carrara, 1983; Baeza, 1994; Baeza y Corominas, 2001). El resultado es una serie de funciones basadas en la presencia ausencia de deslizamientos que son combinación lineal de los factores de mayor significación estadística en la definición de la inestabilidad y consecuente generación de los movimientos de ladera. En el análisis discriminante, trata de dividir las laderas o unidades del terreno en dos poblaciones (estable e inestable) utilizando un conjunto de parámetros (variables) característicos de las mismas (por ejemplo, pendiente, litología, orientación, cubrimiento vegetal, etc). Esta técnica persigue la separación óptima de las dos poblaciones, minimizando la clasificación errónea de las laderas previamente identificadas como estables o inestables. Las variables independientes seleccionadas se combinan de forma lineal y la función discriminante adopta pues la siguiente forma: $D = d_1V_1 + \dots + d_nV_n$.

Donde V_i son las variables independientes de mayor significación estadística, D_i son los coeficientes de clasificación estimados y D es el valor discriminante de la función.

Actualmente los sistemas de información geográfica SIG facilitan el manejo de grandes volúmenes de información y la aplicación de técnicas cuantitativas en la evaluación de la susceptibilidad (Chacón et al., 1992; Santacana et al., 2003). Mediante los SIG, los factores analizados pueden obtenerse de forma automática, en algunos casos con un menor coste, gracias a los modelos digitales de elevaciones, permitiendo ser almacenados y analizados de forma digital.

En cuanto a metodologías ampliamente aceptadas, los métodos disponibles se dividen en métodos de tipo data-driven, utilizados para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos (Corominas et al. 2014) como se presentan en la Tabla 9, los cuales permiten, a partir de la combinación de factores que han generado deslizamientos en el pasado, y tratamientos de tipo estadístico, predecir de manera cuantitativa para áreas aún no afectadas que reúnan condiciones similares. La salida de estos métodos puede expresarse en términos de probabilidad.

Tabla 9. Métodos recomendados para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos de tipo data-driven (Corominas et al, 2014)

Tipo	Método	Referencias
Métodos estadísticos biviados	Likelihood ratio model (LRM)	Lee (2005)
	Information Value Method	Yin and Yan (1988)
	Weights of evidence modelling	Van Westen (1993), Bonham-Carter (1994), Suzen and Doyuran (2004)
	Favourability functions	Chung and Fabbri (1993), Luzi (1995)
Multivariate Statistical Method	Discriminant analysis	Carrara (1983), Gorsevski et al. (2000)
	Logistic regression	Ohlmacher and Davis (2003), Gorsevski et al (2006a)
ANN	Artificial Neural Networks	Lee et al (2004), Ermini et al. (2005), Kanungo et al. (2006)

En métodos bivariados, cada factor es combinado con el mapa de distribución de deslizamientos y se calculan pesos a partir de las densidades de deslizamientos para cada clase de cada parámetro. Existen varios métodos estadísticos que se pueden usar para obtener los valores de los pesos como el information value method, weights of evidence, reglas de combinación bayesiana, certainty factors, métodos de Dempster-Shafer, y Lógica Difusa. Los modelos de tipo bivariado no toman en cuenta la interdependencia entre variables, y puede servir de guía para explorar los sets de datos antes de utilizar métodos multivariados. Los métodos multivariados evalúan la relación combinada entre una variable dependiente y una serie de variables independientes. En este tipo de análisis, se consideran todos los factores relevantes. Los análisis se hacen utilizando regresión múltiple, regresión logística, análisis discriminante, random forest or active learning. Los resultados pueden expresarse en términos de probabilidad. Estos métodos se han convertido en un estándar a escala regional de evaluación de susceptibilidad.

1.4.4.9. Métodos geomorfológicos

En este tipo de análisis lo más importante es el mapeo de los PRM y su caracterización geomorfológica, para determinar el grado de peligro o susceptibilidad de una zona. El grado de peligro se evalúa en el sitio, por lo tanto, las reglas de decisión pueden variar de un sitio a otro. Estos métodos son considerados subjetivos ya que interviene el criterio y la experiencia del especialista. La principal ventaja es la validez y el detalle del análisis y del mapa final, en caso de que un buen experto los realice; la desventaja es el alto grado de subjetividad, ya que depende del conocimiento y experiencia del autor. El término subjetivo no implica una descalificación: un análisis “subjetivo” puede traducirse en un mapa realista de las condiciones de peligro en una zona cuando es realizado por un experimentado especialista y un análisis “objetivo” puede no dar resultados confiables cuando está basado en simplificaciones que se alejan de la realidad.

Este método se basa en el siguiente principio: “el pasado y el presente son la llave que explica el futuro”. Así, los deslizamientos futuros se producirán con mayor probabilidad en aquellas zonas donde las características geológicas, morfológicas y climáticas hacen que éstos se produzcan en la actualidad y se hayan producido en el pasado. Los mapas geomorfológicos se han utilizado como documentos de base para identificar las zonas más susceptibles de un territorio. Los mapas geomorfológicos sin embargo, representan básicamente las zonas movidas con sus atributos, pero no son mapas de susceptibilidad. Éstos evalúan la propensión a la inestabilidad tanto de las zonas movidas como las no movidas (Ayala-Carcedo, 2003).

El grado de estabilidad de una ladera puede establecerse por analogía con otras laderas de la misma litología y entorno geográfico. Así, Colin-Rouse y Farhan (1976) o Brand y Hudson (1982), analizando laderas naturales encontraron ángulos críticos para diversas litologías que, por encima de los cuales, en condiciones hidrológicas desfavorables, era frecuente encontrar roturas. Estos ángulos críticos suelen estar en concordancia con los análisis de estabilidad. Se han realizado

también intentos de relacionar la superficie de la cuenca vertiente que alimenta un punto de la ladera con su pendiente y el grado de propensión a la rotura (Oyagi, 1984).

1.4.4.10. Mapas de peligro

Las cartografías de peligrosidad representan la posibilidad o probabilidad de ocurrencia de los procesos en un área determinada y para un periodo de tiempo dado, zonificando el territorio en diferentes grados. Para ello, deben de ser considerados, además de los factores condicionantes, todos los posibles factores desencadenantes, tanto naturales como antropogénicos (lluvias, sismos, cortes de carreteras, minas a cielo abierto, cambios en el uso de suelo etc.).

En el caso de los mapas de peligro, la predicción temporal de ocurrencia de movimientos se puede establecer con base en: 1. Correlación directa con las lluvias; 2. Medición de los movimientos; 3. Medición de presiones intersticiales.

El primer método se basa en la relación entre precipitaciones y movimientos de ladera, al actuar las primeras como factor desencadenante; su validez es mayor en el caso de zonas propensas a movimientos superficiales en materiales sueltos o blandos y puede emplearse para prevención a largo plazo. El segundo método implica el control y la instrumentación de las laderas inestables con la finalidad de medir los desplazamientos, obtener las relaciones tiempo-desplazamiento y predecir, con base en los movimientos registrados, el momento de la rotura. Algo similar sucede en el tercer método, basado en la relación existente, en determinados casos, entre la posición del nivel freático y la ocurrencia de deslizamientos. El principal inconveniente de la predicción temporal de movimientos de ladera es que se necesitan datos cuantitativos de los factores que desencadenan las inestabilidades en una zona determinada (registros históricos detallados, datos instrumentales). Las predicciones pueden ser válidas en deslizamientos concretos o en áreas limitadas, no siendo aplicables a grandes extensiones por su complejidad y el elevado coste de la instrumentación. Además, los datos obtenidos para una determinada zona no son extrapolables, debido a la variabilidad de las condiciones.

1.4.4.11. Mapas de riesgo

Evaluar el riesgo es una tarea más compleja de lo que se cree y generalmente muchos mapas que se consideran de riesgo son en realidad de peligro o en ocasiones apenas de inventario.

La metodología general a seguir para realizar los mapas de riesgo es:

1. Estimación de la peligrosidad de los PRM considerados, para una intensidad o magnitud y un periodo de tiempo (o periodo de retorno) seleccionado; para ello debe realizarse la predicción espacial y temporal de la ocurrencia de los procesos.

2. Identificación y valoración de los elementos sociales, estructurales y económicos (y ambientales y culturales en su caso) que pueden ser afectados.

3. Evaluación de la vulnerabilidad social, estructural y económica (y ambiental y cultural en su caso) de los elementos expuestos.

4. Estimación del riesgo a partir de la peligrosidad y de la vulnerabilidad y coste o valor de los elementos, conjuntos de elementos o zonas consideradas.

Además de los elementos sociales y estructurales y de las actividades económicas, pueden considerarse los elementos culturales, como monumentos y edificios históricos, y los ambientales, como parques o zonas protegidas. En ambos casos la estimación del valor de los mismos es una tarea compleja y difícil.

La representación de los datos obtenidos en las fases descritas puede realizarse en mapas diferentes (de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo) o en un mapa integrado que refleje todos los aspectos.

Ante las dificultades para realizar las predicciones temporales para la estimación de la peligrosidad, y definir las probabilidades, la peligrosidad suele expresarse con frecuencia de forma cualitativa (peligrosidad alta, media y baja), o únicamente referida a la localización espacial de los procesos, por lo que muchos de los mapas denominados de peligrosidad, e incluso de riesgo, son en realidad mapas de susceptibilidad.

El marco conceptual propuesto por Castellanos-Abella (2008), presentado en la Figura 5, es muy útil para representar las diferentes etapas del proceso de Evaluación de Riesgo por deslizamientos y que podrían constituir fases del proceso de valoración del riesgo.

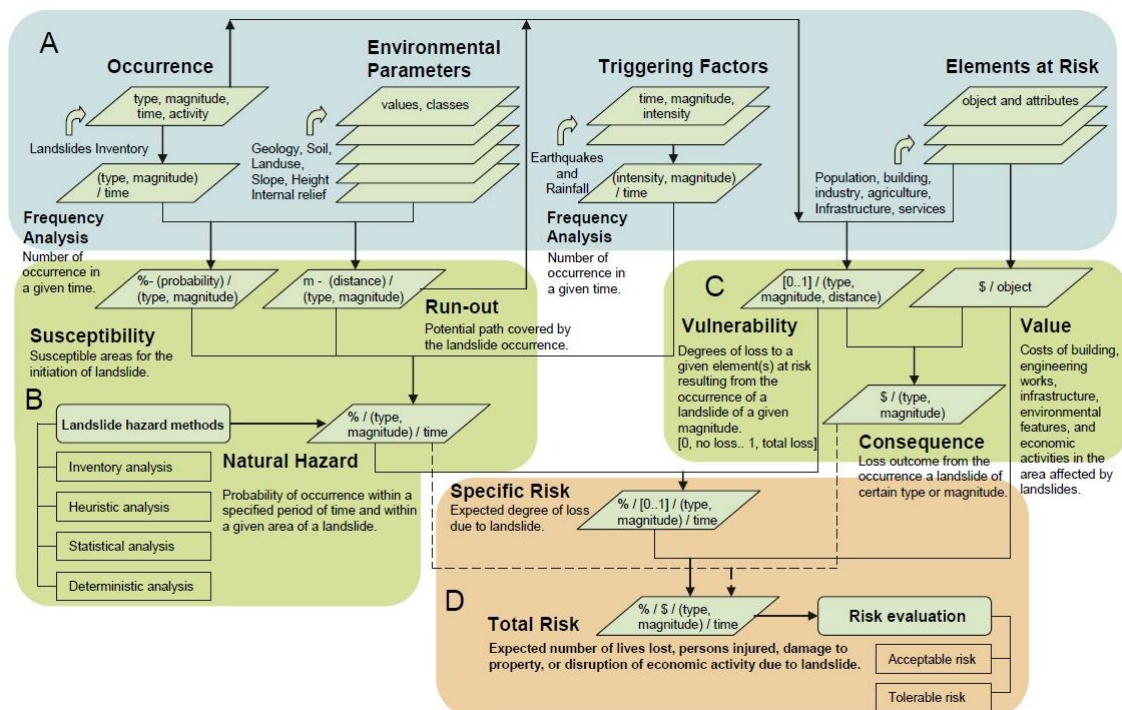


Figura 5. Esquema para la evaluación espacial de riesgo por deslizamiento. Castellanos-Abella (2008)

Distingue claramente cuatro etapas muy diferenciadas:

- A. Recolección de datos, paso inicial donde se desarrollan análisis de frecuencias sobre el inventario de deslizamientos y bases de datos de lluvias y terremotos.
- B. Evaluación de amenaza por deslizamiento, quizá se trata del paso más conocido para estudios de deslizamiento y uno de los que más investigación aglutina.
- C. Evaluación de vulnerabilidad, probablemente la parte más débil en todo el proceso por el escaso trabajo que se ha hecho en la cuantificación de la vulnerabilidad física frente a deslizamientos (van Westen et al., 2005).
- D. Evaluación del riesgo.

Adicionalmente, este enfoque presenta la ventaja de diferenciar claramente entre zonificación de susceptibilidad a través del análisis de los factores causales y el inventario de deslizamientos, e incluir en una etapa sucesiva el cálculo de la amenaza mediante la consideración de factores detonantes (sismo, lluvia). Por esta razón, a partir de este esquema conceptual, se ha planteado una evaluación secuencial que depende de la información disponible, para valorar el riesgo por deslizamiento para el ordenamiento territorial como lo muestra la figura siguiente.

En diferentes lugares del mundo se han aplicado técnicas similares a las enunciadas, con diferentes resultados y alcances. En general, se observa una utilización cada vez mayor de técnicas numéricas basadas en datos “objetivos” provenientes de análisis basados en sistemas de información geográfica y sensores remotos. A continuación se hace un repaso por diferentes modelos planteados en la literatura especializada.

1.4.5. Revisión de la literatura

A finales de la década de 1960s, en los Estados Unidos, se publicaron mapas para mostrar condiciones de estabilidad de laderas (Blanc and Cleveland, 1968), incidencia de deslizamientos representada en monto relativo de depósitos de deslizamientos (Radbruch-Hall, 1970; Radbruch-Hall and Crowther, 1973), depósitos de deslizamientos (Brabb and Pampeyan, 1972) y susceptibilidad cualitativa a deslizamientos (Dobrovoiny, 1971; Scott, 1972; Davis, 1974a, j; etc.). La evaluación de susceptibilidad cualitativa se preparó inicialmente a partir de trabajo de campo, buscando factores de inestabilidad alrededor de deslizamientos, con criterios geológicos; estos métodos utilizaban criterios subjetivos de los autores.

Algunos países también han preparado mapas cualitativos similares, con el objeto de encontrar zonas expuestas a riesgo de deslizamiento o inestabilidad de laderas (programa ZERMOS del French Laboratoire de Ponts et Chaussées, Paris: Antoine, 1977; Humbert, 1977; Landry, 1979; Meneroud 1978, etc.; Kienholtz, 1978 en Suiza, etc.). Un ejemplo de los principales mapas de susceptibilidad cualitativos, publicado por el USGS (Radbruch, 1970; Scott, 1972; Davies, 1974; etc.)

es un mapa presentando áreas susceptibles en Jefferson County, Colorado, Scott (1972), dividido en cuatro zonas.

Otros métodos semi-cuantitativos para elaborar mapas de susceptibilidad a la amenaza o inestabilidad de laderas, basados en análisis de ángulos de pendiente, litología y montos relativos de material deslizado también se han publicado (Blanc and Cleveland, 1968; Radbruch and Crowther, 1973; Nilsen and Brabb, 1977; Nilsen and Wrigth, 1979). El mapa de deslizamientos de California fue elaborado por Radbruch and Crowther (1973) en escala 1: 1,000,000. En este caso, el rango de valores utilizado comienza en ángulos de pendientes menores a 5 grados y lluvias de menos de 10 pulgadas, con muy poca evidencia de deslizamientos, clasificados en la unidad 1, hasta el extremo opuesto, con áreas ampliamente cubiertas por deslizamientos como unidad 6. Nilsen and Wrigth (1979) en un mapa de deslizamientos de la bahía de San Francisco a escala 1:125,000, distinguen pendientes <5 , 5-15, y >15 , y grupos litológicos, clasificando la región en seis zonas: 1. Estable, 2. Generalmente estable, 3. Moderadamente estable, 4. Moderadamente inestable, 5. Inestable. Estos mapas, a diferentes escalas, estuvieron orientados hacia la clasificación de las unidades del terreno a partir de la evidencia de deslizamientos. Sin embargo, como no se hizo ningún intento de previsión temporal, desde el punto de vista de Varnes (1978), se consideran más cercanos a mapas de inventarios que a mapas de amenaza.

Stevenson (1977) propone mapas de amenaza y riesgo basados en ratings numéricos o pesos de pendientes y factores geológicos, a partir de datos geotécnicos. Otras contribuciones interesantes fueron los mapas de riesgo lineal en vías (Meneroud, 1978) y mapas de estabilidad geotécnica con ratings a partir de parámetros mecánicos como la cohesión, ángulo de fricción o discontinuidades en rocas (Vecchia, 1978). Estos trabajos generalmente proponen zonificaciones de riesgo de deslizamiento o índices de terreno mostrando la estabilidad de las laderas. El término riesgo se utiliza aquí como sinónimo de susceptibilidad a deslizamientos y presenta un enfoque semicuantitativo.

Una de las primeras aproximaciones cuantitativas a la susceptibilidad a deslizamientos fue propuesta por Brabb et al. (1972) mediante la introducción de un método semicuantitativo consistente en un análisis bivariado de porcentajes de áreas con deslizamientos en intervalos de ángulos de pendientes, expresado en valores relativos de susceptibilidad a partir de los cuales se obtenía una zonificación de la susceptibilidad. Este enfoque pionero proporcionaba una definición formal de susceptibilidad a deslizamientos como la indicación de qué tan factible es que una unidad de terreno se deslice. También ofrece un método para clasificar unidades de terreno con valores relativos de susceptibilidad basados en unidades geológicas, ángulos de pendiente y porcentaje de deslizamientos en cada unidad, realmente difícil de aplicar en su tiempo.

Campbell (1973) presentó otro método para evaluación estadística de distribuciones regionales de deslizamientos, basado en el trabajo de Schmidt and Mac Cannel (1955). El trabajo se

elaboró sobre un inventario de deslizamientos a escala 1:24.000, utilizando círculos contiguos para estimar la superficie cubierta por deslizamientos.

Con la evolución de la informática, Lessing et al. (1976) en West Virginia (USA), Newman et al. (1978) en la Bahía de San Francisco y Carrara et al. (1977, 1978) en la Cuenca del Ferro (Calabria, Italia), introdujeron técnicas computacionales para analizar factores causales de deslizamientos y obtener lo que ellos denominaron zonas propensas a deslizamientos, susceptibilidad a deslizamientos o zonificación de amenaza por deslizamiento; en cualquier caso, prescindiendo de un componente temporal de pronóstico. El poder de cálculo permitía zonificaciones basadas en estadística, por ejemplo, mediante factores discriminantes (Simons et al., 1978) y usando análisis bivariado (Neulands, 1976) o multivariado (Carrara, 1983).

Una contribución relevante a la investigación en el tema viene del trabajo pionero de Carrara and Merenda (1976), Carrara (1983) and Carrara et al. (1977, 1978). Varnes (1984) describió las contribuciones de Carrara et al. (1978) en la Cuenca fronteriza entre Calabria-Lucania, Italia, como uno de los más avanzados y accesibles análisis del estado del arte de atributos del terreno para producción de mapas de amenaza de deslizamiento utilizando procesamiento por computador. Los objetivos fueron definir la estabilidad de laderas mediante análisis multivariado. Inicialmente utilizaban celdas de terreno de 200mx200m como punto de partida. En posteriores estudios incorporaron el uso de unidades morfométricas, pero el método no sufrió variaciones notables.

Otro método que utilizaba análisis multivariado y GIS fue presentado por Bernknopf et al. (1988), aplicando análisis de regresión múltiple y utilizando la presencia o ausencia de deslizamientos como variable dependiente y los factores usados en el modelo de estabilidad del terreno (espesor del suelo, resistencia, ángulo de pendiente), como variables independientes. En este caso, las funciones de regresión resultantes permitían estimar la probabilidad de deslizamiento para cada píxel. De manera similar, Baeza (1994) contribuyó al análisis multivariado de la incidencia de deslizamientos superficiales en los Pirineos (España) usando paquetes estadísticos.

El enfoque de matrices (DeGraff and Romesburg, 1980) es otro método objetivo y cuantitativo para establecer índices de estabilidad sobre un área y evaluar la susceptibilidad a deslizamientos. Consiste en medir atributos del lecho rocoso, pendiente y orientación de las laderas a partir de fotointerpretación, trabajo de campo y un inventario de deslizamientos. Mediante la elaboración de matrices con los atributos, y la agrupación por clases según la localización de deslizamientos, se obtiene una zonificación de susceptibilidad cuantitativa con un pequeño componente de juicio experto.

También se han hecho esfuerzos en la evaluación de amenaza de deslizamiento a partir de relaciones con patrones de lluvia a escala global (Caine, 1980) y regional (Cannon and Ellen, 1985;

Canuti et al., 1985; Larsen and Simon, 1993). Cuando coinciden con datos en tiempo real, este tipo de análisis proveen las bases de sistemas de alerta temprana para la ocurrencia de deslizamientos superficiales (Keefer et al., 1987; Iiritano et al., 1998). En el caso de deslizamientos detonados por terremotos, se han propuesto relaciones simples entre la magnitud del terremoto y la distancia al epicentro, como indicadores para evaluación de amenaza por deslizamiento (Keefer, 1984). En general, el problema para los análisis de deslizamientos detonados por movimientos sísmicos, es la incertidumbre asociada con las localizaciones, magnitud y temporalidad de los mismos.

En el caso de análisis de estabilidad de laderas individuales, se han utilizado modelos determinísticos desde el principio del siglo XX (Nash, 1987). Recientemente, varios investigadores han comenzado a usar los mismos modelos para el cálculo de la estabilidad de laderas en grandes áreas, como cuencas hidrográficas (Ward et al., 1981, Ward et al., 1982; Okimura and Kawatani, 1987; Brass et al. 1989; Benda and Zhang, 1990; Murphy and Vita-Finzi 1991; Van Asch et al., 1993; Van Westen et al., 1993; Terlien et al., 1995; Terlien, 1996). Muchos métodos utilizan el modelo de talud infinito, por su simplicidad al utilizarse en cada píxel de terreno separadamente. La combinación de técnicas hidrológicas, para estimar la presión de poros en la superficie del terreno y el uso general de modelos hidrológicos con modelos de estabilidad también ha dado resultados satisfactorios, por ejemplo en el trabajo de Terlien et al. (1995) and Terlien (1996).

Con el aumento de poder de cálculo de los computadores y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica GIS, las diferentes técnicas disponibles han sido fácilmente aplicables gracias a las enormes posibilidades de análisis y procesamiento de datos que se generan. Algunas de las técnicas disponibles en la literatura de análisis de deslizamiento a partir de GIS, se mencionan en las siguientes páginas.

Fall and Azzam (1998) utilizan GIS para elaborar un mapa con el riesgo natural en el área costera de Dakar, Senegal. El análisis se valió de ArcInfo y ArcView para obtener mapas de riesgo natural a partir de tres grupos de factores de inestabilidad: hidrogeológico, erosión costera y parámetros geotécnicos, mostrando seis zonas diferenciadas. Métodos similares pueden encontrarse en el trabajo de Kawakami and Saito (1984), Lee et al. (2001). La existencia (o no) de procesos de inestabilidad fue propuesta como herramienta para la planificación de usos del suelo en regiones costeras afectadas por crecimiento urbano. Wachal and Hudak (2000) utilizan técnicas GIS en un área de 1.500-2.000 km² en Travis Country (USA), basado en cuatro factores: pendiente, geología, vegetación y distancia a fallas. Mediante la ponderación de estos factores según su contribución al proceso de inestabilidad, se generaron cuatro clases de susceptibilidad relativa. Moreiras (2004) evaluó la susceptibilidad en un área de 1600 km² en la parte occidental de la ciudad de Mendoza, Argentina, a partir de fotointerpretación, análisis de imágenes LandSat y trabajo de campo. Los valores de susceptibilidad relativa se asignaron tomando en cuenta la litología y la pendiente además del inventario de deslizamientos.

Parise and Jibson (2000) propusieron una metodología para obtener susceptibilidad a deslizamientos detonados por eventos sísmicos. Elaboraron un inventario de deslizamientos ocurridos durante el terremoto de Northridge (1994, California, USA, magnitud $M:6.7$), las distancias al epicentro y los datos sobre la intensidad dinámica fueron expresados como intensidades Arias (Arias, 1970). A partir de esto se elaboró un Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos, LSI, como la relación en porcentaje del área cubierta por deslizamientos en cada unidad geológica y el área total de la unidad, y un índice de frecuencia de deslizamientos, como el número de deslizamientos por kilómetro cuadrado. Se obtuvo una zonificación con cuatro clases de susceptibilidad relativa, con resolución de $10\text{m} \times 10\text{m}$ a escala 1:24.000: muy alta ($>2.5\%$ área con deslizamientos o $>30 \text{ LS/ km}^2$), alta ($1.0\text{--}2.5\%$ área con deslizamiento o $10\text{--}30 \text{ LS/km}^2$), moderada ($0.5\text{--}1.0\%$ área de deslizamiento o $3\text{--}10 \text{ LS/km}^2$) y baja ($<0.5\%$ área de deslizamiento y $<3 \text{ LS/km}^2$).

El caso de evaluación de amenaza por caída de rocas mediante GIS y su análisis, fue abordado por varios autores, por ejemplo, Ayala-Carcedo et al. (2003) mediante el análisis heurístico, utilizando ArcInfo, y datos de caída de rocas en la Sierra de la Cabrera (Madrid, España).

Uno de los primeros papers publicados en Estados Unidos, utilizando SIG para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos, amenaza y riesgo (Mejia-Navarro et al., 1994) usaba factores ponderados mediante algoritmos, relacionando susceptibilidad y factores causales. La investigación fue un proyecto piloto elaborado sobre ArcInfo y GRASS GIS para evaluar la utilidad de los GIS como soporte a las decisiones en planificación integrada, evaluando diferentes amenazas geológicas. Los mapas base se presentaron en escalas entre 1:4.000 y 1:25.000.

Otro ejemplo de factores ponderados con pesos fue utilizado por Temesgen et al. (2001) en un estudio en el área occidental de Wondogenet, Etiopía, mediante un modelo raster en GIS. Se hicieron estimativos de frecuencia de ocurrencia de deslizamientos considerando la litología, red de drenajes, geología, pendientes, orientación de laderas y cobertura vegetal. Los pesos iniciales se asignaron según la densidad de deslizamientos observada para cada clase, y los mapas resultantes se combinaron para producir mapas de susceptibilidad. La integración final fue hecha usando atributos de pixel, cálculos algebraicos y aritméticos. La amenaza de deslizamiento fue derivada de la integración de todos los mapas de susceptibilidad.

Van Westen et al. (2003) evaluaron la importancia del conocimiento experto en geomorfología en la producción de mapas de susceptibilidad a deslizamientos, utilizando GIS con análisis bivariado indirecto. Utilizando software GIS (ILWIS) y un paquete cartográfico (ACE) para obtener mapas escala 1:10.000. El área de pruebas fue una zona montañosa de 20.8km^2 en la cuenca Alago, Italia. Los datos fueron obtenidos a escala 1:5.000 con resolución de píxel de $3\text{m} \times 3\text{m}$. Dentro de las variables consideradas estaban la litología, geología estructural, materiales superficiales, clases de pendientes, uso del suelo y distancia de ríos, vías y casas. La densidad de

deslizamientos en el área, ocupada por cada factor, comparada con la densidad de deslizamientos del área completa, ofrece la importancia de cada factor en el proceso de inestabilidad. Usando los pesos del método de la evidencia (Bonham-Carter, 1994), se elaboraron los mapas de susceptibilidad mediante el GIS. Los autores concluyeron que la mejor manera de elaborar mapas de susceptibilidad es mediante métodos basados en conocimiento experto como índices multiclase o métodos de lógica difusa.

Ayalew et al. (2004) desarrollaron un modelo que considera frecuencias de deslizamiento y conocimiento experto de los factores de influencia en la inestabilidad de laderas del área Tsugawa, perteneciente al río Agano, en Japón, asignando pesos a seis factores mediante combinaciones lineales. El software IDRISI fue utilizado por Ayalew and Yamagishi (2005) para diseñar un mapa de susceptibilidad a deslizamientos de un área de 105 km² en las montañas Kakuda-Yahiko, en Japón, por métodos de regresión combinados con análisis de estadística bivariada. Otra interesante contribución mediante pesos de factores en aplicaciones GIS fue presentada por Donati and Turrini (2002) para un área en los Apeninos, Italia.

Siguiendo los trabajos pioneros de Carrara and Merenda (1976), Carrara et al. (1977, 1978), Carrara (1983), resulta claro que los análisis multivariantes y los GIS son particularmente útiles para abordar el problema de deslizamientos, además del uso complementario de software estadístico para el análisis (Chung, 1995; Baeza and Corominas, 1996; Luzi and Pergalani, 1996a, b; Chung and Fabri, 1999; Baeza and Corominas, 2001; Lee and Min, 2001; Marzorati, 2002; Park and Chi, 2003; Ercanoglu et al., 2004; Süzen and Doyuran, 2004b; Xie et al., 2004; Carrara and Guzzetti, 1995; Carrara et al., 1991a, b, 1992, 1995, 2003; Guzzetti et al., 1999, 2000, 2004, etc.).

Algunos enfoques adoptan un tratamiento probabilístico de datos para la estabilidad de laderas mediante la utilización de métodos de Monte Carlo (Zhou et al., 2003). Estos métodos también se han combinado con enfoques de incertidumbre. Muchos papers publicados utilizan técnicas estadísticas, incluyendo pesos de factores, evaluaciones de expertos, lógica difusa o redes neuronales basados en métodos probabilísticos de índices de fiabilidad.

Hong Kong ha sido una de las fuentes que más ha contribuido a las técnicas de pronóstico. Algunos ejemplos de aplicaciones con GIS son las elaboradas por Dai et al. (2000), and Dai and Lee (2001, 2002a and b) para la Isla Lantau, que es frecuentemente amenazada por eventos de deslizamiento. Su metodología utiliza ArcView y el paquete estadístico SPSS para elaborar regresiones logísticas multivariantes de presencia-ausencia de variables dependientes relacionando deslizamientos y factores causales. La escala utilizada fue 1:20.000 con una resolución de 20mx20m y un inventario de 800 deslizamientos.

En el área de Yongin, en Corea del Sur, Lee and Min (2001), usando análisis bivariado y multivariado y ArcInfo, elaboraron análisis de 14 diferentes factores, con resolución de 10mx10m,

validándolos y llegando a la conclusión que los métodos de análisis bivariados son más fáciles de implementar con buenos resultados. Santacana et al. (2003) estudió parte del área de La Población de Lillo (Pirineos, España) mediante estadística multivariada y análisis discriminante, utilizando ArcInfo y validando los resultados.

Süzen and Doyuran (2004a) estudiaron un área de 200 km² en la cuenca de Asarsuyu (Turquía) a escala 1:25.000, usando GIS y métodos estadísticos de regresión bivariados y multivariados. El primer método fue rápido pero menos adecuado, mientras el segundo, más complejo pero con mejor correspondencia entre los factores causales y los deslizamientos. Se analizaron treinta factores y sus relaciones con un inventario de 49 deslizamientos de diferentes tipos, en su mayoría deslizamientos traslacionales, superficiales y flujos de escombros. La zonificación fue validada mediante comparación con actividad previa de deslizamientos.

Ercanoglu et al. (2004) elaboraron un mapa de susceptibilidad a deslizamientos para un área de 64 km² en la región de Yenice en Turquía, utilizando GIS para sobreponer factores con pesos, mediante estadística multivariable y técnicas de análisis factorial. Se hizo una validación con 57 deslizamientos registrados en las zonas susceptibles. Lee (2004) elaboró un mapa del área Janghung en Corea del sur, usando estadística bivariada y multivariada y un tamaño de píxel de 10m x 10m. Muchos de los deslizamientos en los 41 km² bajo estudio fueron superficiales. El método multivariado resultó más adecuado, si bien consumía más tiempo y su aplicación era más compleja. Dias and Zuquette (2004) presentaron una zonificación probabilística interesante en Ouro Preto, Brasil, y Ohlmacher and Davis (2003) una aplicación de la regresión logística para mapear la amenaza en Kansas, USA.

A medida que los instrumentos de cálculo han mejorado en potencia, se han publicado métodos matriciales mediante GIS (Irigaray, 1990, 1995, citado por Chacon et al., 2006), incorporando mayor número de atributos. Por ejemplo, en la cordillera Bética (España), en un área de cerca de 15.000 km², varios autores han elaborado mapas de susceptibilidad (cited by Chacon et al., 2006, pp. 359) usando el método matricial GIS. Otros autores con enfoques similares son Cross (1998, 2002), Clerici et al. (2002).

Todos los métodos mencionados en las páginas anteriores analizan factores causales para obtener mapas de áreas propensas a deslizamientos. No obstante, el principal problema en la investigación de la amenaza por deslizamiento es identificar la ocurrencia futura de deslizamientos en un área dada y un período de tiempo determinado. De esta forma, mientras los mapas de susceptibilidad proveen zonificaciones de áreas con similares condiciones de inestabilidad que pueden generar deslizamientos, un mapa real de amenaza debe ofrecer una zonificación de áreas con similares probabilidades de deslizamiento, en un período de tiempo dado, a partir de análisis cuantitativos de datos (Chacon, 2006).

Einstein (1988) sugirió la proyección temporal de los mapas de susceptibilidad a partir de las altas probabilidades que existen de que nuevos deslizamientos ocurran en zonas altamente susceptibles. La validación reciente de mapas de susceptibilidad (Irigaray et al., 1999, 2006) confirman este enfoque, con un set de 125 deslizamientos activados por lluvias en 1997 en la presa del río Iznajar (Granada, España), 61.9% de los nuevos deslizamientos sucedieron en zonas de muy alta susceptibilidad, según un mapa previo (1994) elaborado a partir de 833 deslizamientos antiguos. Otras validaciones similares se han hecho en el área sur occidental de Sierra Nevada, en España, y en Torre Vedras, en Portugal, entre otros.

Terlien et al. (1995) and Terlien (1996, 1997) modelaron las variaciones temporales de deslizamientos activados por lluvias, a partir de una investigación detallada, incluyendo instrumentación en campo y un alto número de test geotécnicos. Los principales pasos fueron la identificación del mecanismo detonante de deslizamientos, selección de modelos hidrológicos adecuados, selección de modelos de estabilidad de laderas para entrada de datos en los mecanismos detonantes, determinación de la distribución espacial de los datos de entrada, determinación de las fluctuaciones de presión de poros y sus máximos en superficies de falla potencial y la preparación de mapas de amenaza incluyendo la distribución de probabilidades de falla para diferentes mecanismos detonantes. Los mapas fueron probados por chequeo en sitios con deslizamientos recientes. Terlien (1996) discutió en detalle la importancia relativa y las dificultades para obtener los parámetros de entrada. Indicó la gran dificultad para evaluar la distribución espacial de factores importantes para mapear deslizamientos, como presión de poros, relaciones entre humedad del suelo y cabeza de presión y la relación entre conductividad hidráulica insaturada y humedad del suelo. En el caso de deslizamientos detonados por agua subterránea también es difícil evaluar parámetros importantes como cohesión del suelo, ángulo de fricción, fugas a través de la roca y porosidad efectiva.

Los resultados de la aplicación de esta metodología en la evaluación de amenaza por deslizamientos de tipo superficial y profundo, detonados por lluvia, en Manizales, Colombia (Terlien, 1996, 1997) fueron de tipo conservador. El modelo presentó áreas potencialmente inestables de 5 a 10 veces mayores que las actuales áreas con deslizamientos observables. Esta falla aparente de la evaluación temporal se cree causada por una estimación errada de la frecuencia de deslizamientos y la pobre calidad de los datos de entrada.

La predicción espacial, a través de SINMAP (Índice de Estabilidad, Stability Index Mapping, en inglés), después de Pack et al. (1998), estuvo basada en métodos de equilibrio límite, usando conjuntamente un modelo de talud infinito y un modelo hidrológico estacionario (TOPMODEL), como se describe en Connell et al. (2001). El índice de estabilidad (SI) se definió como la probabilidad de estabilidad de ladera [$SI = \text{Probabilidad } (Fs > 1)$] sobre la distribución de parámetros inciertos (cohesión c , ángulo de fricción, precipitación efectiva Q , y transmitividad del

suelo T). El índice de estabilidad fue utilizado para definir seis clases de estabilidad, desde alta ($SI > 1.5$) hasta baja ($SI = 0$). Se produjeron varios mapas de estabilidad usando SINMAP para diferentes condiciones de precipitación. El modelo fue utilizado para predecir deslizamientos detonados por lluvia, y los mapas resultantes fueron considerados una herramienta útil para los ciudadanos, planificadores e ingenieros, para reducir pérdidas a través de la prevención, mitigación de este tipo de eventos.

Otro modelo basado en principios físicos para análisis de deslizamientos superficiales es SHALSTAB, el cual combina datos digitales del terreno con información de flujo subsuperficial y el modelo de talud infinito (Montgomery and Dietrich, 1994; Dietrich and Montgomery, 1998; Montgomery et al., 1998). El modelo se ha aplicado satisfactoriamente en varios lugares, entre ellos el norte de California, Washington y Oregón (Montgomery and Dietrich, 1994; Dietrich, 2001). El modelo ha demostrado mejores resultados en cuencas escarpadas con sustento rocoso superficial, y un poco peor en cuencas menos escarpadas sobre depósitos glaciares gruesos (Montgomery et al., 1998; Borga et al., 2002b; Fernandes et al., 2004).

A partir de un modelo de deslizamientos no distribuido propuesto por Sidle (1992), se desarrolló un modelo distribuido, basado en principios físicos del modelo de estabilidad (dSLAM), para analizar deslizamientos superficiales rápidos a nivel de cuenca en un entorno GIS (Wu, 1993; Wu and Sidle, 1995, 1997; Sidle and Wu, 1999). Este modelo evalúa los efectos espaciales y temporales de la explotación maderera en la estabilidad de laderas. El modelo distribuido incorpora: Análisis de talud infinito, cambios en la cohesión de las raíces y sobrecargas por vegetación, influencia estocástica de patrones de lluvia actuales en la presión de poros. Recientes mejoras al modelo (renombrado a IDSSM) incluyen la posibilidad de simular múltiples ciclos de explotación, manejo más eficiente de datos de precipitación y actualización del modelo de distribución de agua subterránea poco profunda (DSGMFW) (Dhakal and Sidle, 2003 2004a, b; Sidle and Dhakal, 2003).

TRIGRS es uno de los pocos modelos distribuidos que incorpora los efectos de la infiltración de lluvias en la respuesta dinámica de la presión de poros del suelo (Baum et al., 2002). Este modelo extiende el de Iverson (2000), modelo de deslizamientos basado en infiltración a nivel de cuencas, adicionando una solución para el límite impermeable a una profundidad finita. Otros supuestos incluyen condiciones de suelo cercanas a la saturación, drenaje de campo bien documentado, y propiedades hidrológicas del suelo relativamente isotrópicas y homogéneas.

Iida (2004) desarrolló un modelo hidro-geo-morfológico para predicción de deslizamientos superficiales que considera el carácter estocástico de la intensidad y duración de las lluvias y los aspectos determinísticos que controlan la estabilidad de laderas, donde la probabilidad en el corto plazo (de deslizamientos) es definida como la probabilidad de que la profundidad del suelo

saturado exceda un valor crítico. El modelo se aplicó a un área en el este de Hamada, Japón, donde se presentaron deslizamientos durante las lluvias fuertes de 1988.

Uno de los pocos enfoques distribuidos de deslizamientos profundos fue desarrollado por Miller (1995). El modelo incorpora variables topográficas, geológicas y datos del suelo de mapas escala 1:24.000 con el método de Bishop modificado para el análisis de estabilidad (Bishop, 1995), en un entorno GIS. La aplicación del modelo se efectuó en la cuenca Montague Creek, en el noroeste de Washington. Se asumieron suelos completamente saturados, y se observaron discrepancias importantes entre las predicciones y los puntos donde ocurrieron deslizamientos, parcialmente debido a este supuesto.

Usando el método de mapas de isopletas (Campbell, 1973), Coe et al. (2000) preparó un mapa de la ciudad de Seattle (Washington, USA) a partir de una base de datos de deslizamientos entre 1897 y marzo de 1998. Estos 88 años de datos se transformaron en un mapa de densidad, utilizando una cuadrícula de 25mx25m en un entorno GIS. Se calculó un intervalo medio histórico de recurrencia para cada valor de densidad, dividiendo el periodo cubierto en la base de datos por el número de deslizamientos correspondiente a cada valor de densidad (Croveli, 2000). El siguiente paso fue el cálculo de la probabilidad de excedencia de deslizamientos, considerando un período de tiempo de 1-100 años y un área de 625 m² utilizando el modelo de probabilidad de Poisson. Este es un modelo para la ocurrencia de eventos puntuales aleatorios, con una probabilidad de ocurrencia proporcional al intervalo de tiempo y con distribuciones de probabilidad iguales para los diferentes intervalos de tiempo. A pesar de estos supuestos, el modelo fue considerado un buen aproximador, pues un modelo más preciso sería extremadamente complejo y matemáticamente inabordable (Croveli, 2000). La expresión matemática es $PN(t) \geq 1 = 1 - e^{-t/\mu}$, donde μ es el intervalo futuro de recurrencia estimado con el intervalo medio histórico, y t es un período de tiempo en el futuro para la probabilidad de excedencia calculada para 1, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los investigadores han buscado integrar el mapa con modelos de susceptibilidad a deslizamientos en Seattle (USGS). Si los valores de susceptibilidad pueden calibrarse con probabilidades de excedencia, determinados a partir de datos históricos en áreas bien documentadas, estas probabilidades pueden ser estimadas directamente de valores de susceptibilidad (Coe et al., 2000).

Un excelente paper básico, fundamentado en consideraciones teóricas y un caso de estudio práctico, fue el de Borga et al. (2002), quien presentó un modelo distribuido, basado en principios físicos, para deslizamientos superficiales, que utiliza un índice de humedad cuasi-dinámico para predecir la distribución espacial de saturación del suelo, en respuesta a precipitaciones de duración específica, y permite combinar variables topográficas y climáticas en la estabilidad de laderas. El documento también contiene una revisión del origen y estado actual de los modelos de estabilidad basados en principios físicos. El área de pruebas, de 5 km², estuvo ubicada en la cuenca del río

Cordon (Alpes Italianos, parte Este). Se propuso un índice de humedad cuasi dinámico, como una simple expresión algebraica derivada del flujo subsuperficial y el modelo de estabilidad, para entender mejor las relaciones entre topografía y variabilidad pluviométrica. Este enfoque ofrece mejoras a los modelos estacionarios comunes. A partir de este modelo, es posible obtener la probabilidad de falla como función de la topografía y el clima. Los autores concluyen que el éxito de su metodología depende de la calidad de los datos de entrada. También mencionan la necesidad de establecer procedimientos consistentes de medición y registro de actividad de deslizamientos. Otro ejemplo de aplicaciones de índices de humedad se puede encontrar en Gritzner et al. (2001).

Carrasco et al. (2003) presentó un mapa de susceptibilidad para un sector del Valle Jerte (Sistema Central, España) afectado por lluvias torrenciales. Utilizó métodos estadísticos con un enfoque Bayesiano y dos índices: un índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) y un índice de porcentaje de superficie (SPI). Se analizó un inventario de 830 deslizamientos a escala 1:25.000 y píxel de 25mx25m y cinco factores diferentes. Se generó un mapa de amenaza a partir de las relaciones entre áreas de susceptibilidad a deslizamientos y una evaluación temporal probabilística de precipitación en la cuenca.

Corominas et al. (2003) desarrollaron un análisis de susceptibilidad y evaluación de la amenaza en las montañas del Pirineo, en el Principado de Andorra, a escala 1:5.000. Se utilizaron datos de inventarios de deslizamientos, caída de rocas, litología. Se complementó con un análisis de series temporales de eventos de deslizamientos y series de precipitación. Como producto final, se presentó un mapa, discriminando zonas de amenaza alta, media, baja y muy baja, como instrumento básico en los códigos de construcción de Andorra.

Lan et al. (2004) evaluaron la amenaza de deslizamiento en la cuenca Xiaojiang (Provincia de Yunnan, suroccidente de China). Se llevó a cabo un análisis espacial y predicción de relaciones entre precipitación y deslizamientos utilizando ArcInfo. Se incorporó al análisis una función de certidumbre (CF) que fue desarrollada originalmente por Shortlife and Buchanan (1975), modificada por Heckerman (1986) e introducida en análisis GIS por varios autores (Chung and Fabbri, 1993, 1998; Binaghi et al., 1998). Los factores considerados fueron: grupos litológicos, estructura, distancia a fallas mayores y geomorfología (pendiente, orientación de laderas y elevación). El análisis de los diferentes factores y sus relaciones con el inventario de deslizamientos permite hacer una clasificación de amenaza con valores de CF.

Frattoni et al. (2004) utilizan modelos basados en principios físicos para simular procesos hidrológicos transitorios y procesos geotécnicos en las laderas de Sarno (Sur de Italia) afectadas por un terremoto en mayo de 1998. Los autores utilizan un modelo de talud infinito para análisis de estabilidad, con dos modelos hidrológicos simples: un modelo cuasi-dinámico para calcular la contribución del flujo de agua a la estabilidad de laderas, mediante la simulación de la evolución de la altura de agua en función del tiempo; y un modelo de difusión utilizado para incorporar la

influencia de la presión de poros del agua debida a infiltración vertical durante lluvias fuertes. El último modelo tuvo éxito en predecir correctamente el momento de detonación de más del 70% de los deslizamientos en un área inestable que representa el 7.3% del total de la cuenca. Los resultados confirman la hipótesis del autor sobre la influencia del flujo vertical y lateral en la detonación de deslizamientos durante el terremoto de Sarno.

Xie et al. (2004b) desarrolló una aplicación GIS para amenaza de deslizamientos, incorporando el factor temporal, a partir de modelos de infiltración y estabilidad de laderas que tienen en cuenta el incremento en la presión de poros inducido por el incremento de las lluvias. El área de estudio fueron 3.4 km² alrededor de Harabun, en el nororiente del distrito Sasebo (suroccidente de Japón), donde ocurrió un deslizamiento representativo en julio de 1997. Los cálculos de estabilidad de ladera se basaron en el equilibrio límite del plano de falla, tomando en cuenta también los cambios temporales de las condiciones geotécnicas, especialmente el contenido de humedad. La evolución del factor de seguridad de la ladera en el tiempo y el agente detonante fueron presentados en diferentes mapas.

El uso de redes neuronales artificiales (ANN), lógica difusa y sistemas grises, análisis probabilísticos del factor de seguridad de laderas mediante índices de fiabilidad y análisis fractales, son métodos también aplicados por muchos autores en estudios relacionados con deslizamientos. Igualmente, el abanico de paquetes GIS disponibles ArcInfo, ArcView, GRASS, IDRISI, QGIS, software estadístico R, SPSS, SAS y plataformas de programación tipo MatLab, Visual Studio, se ha ampliado y ha ganado amplio reconocimiento dentro de la temática.

1.5. Síntesis y justificación

A lo largo de los últimos 30 años, como se ha expuesto en las páginas precedentes, se ha elaborado un cuerpo conceptual en torno al riesgo de desastres, suficientemente explícito y robusto. Este marco de referencia se ha obtenido acopiando múltiples elementos de diferentes materias, y combinándolos mediante la interdisciplina y la visión holística.

Tradicionalmente, el concepto de “Desastre” se asocia con eventos de gran magnitud, importantes pérdidas de vida, de bienes y producción, y con la necesidad de la movilización de grandes cantidades de ayuda humanitaria y sustanciales costos para el proceso de rehabilitación o reconstrucción de las sociedades afectadas (Lavell, 2010). No obstante, existen otros eventos de consecuencias más contenidas, que ocurren con cierta recurrencia, también detonados por fenómenos naturales, que tienen impactos acumulativos, y muchas veces pasan desapercibidos dadas las definiciones o umbrales mínimos para ingresar a las bases de datos. Este tipo de procesos, tiende a formar parte de la cotidianidad de muchas comunidades, especialmente en países en vías de desarrollo, y quedar fuera de los procesos de planificación del territorio.

1.5.1. Necesidad de estudios de riesgos a escalas urbanas

Es en los asentamientos urbanos, donde convergen procesos sociales y naturales, mediados por las intervenciones antrópicas propias de los procesos de urbanización y ocupación del territorio y las relaciones sociales. Producto de estos procesos, surge una nueva categoría de amenazas que han recibido el nombre de “**socio-naturales**” (Lavell, 1996), caracterizadas por tener lugar sobre elementos de la naturaleza, pero mediante su concreción como producto de la intervención humana en los ecosistemas y ambientes naturales, y la gestación gradual a través de procesos con componentes estructurales históricos.

Adicionalmente, pese a la existencia de un marco de referencia elaborado, es poco común contabilizar pérdidas, recolectar datos, y evaluar el riesgo sistemáticamente en términos territoriales. Como consecuencia, no es posible direccionar los recursos necesarios para proteger las comunidades e inversiones y reducir la exposición a futuros impactos, y no se dispone de opciones de priorización de esos recursos, al no conocer el riesgo o amenaza asociada a cada porción del territorio.

Teniendo en cuenta que el ordenamiento territorial se hace en función de los municipios, las amenazas a considerar deben tener implicaciones a esta escala. En el contexto andino son muy comunes las áreas urbanas desarrolladas en montañas, con lo cual cobran especial relevancia los procesos que tienen relación con la topografía, como es el caso de los procesos de remoción en masa y las inundaciones, los cuales además se caracterizan por su alta frecuencia de ocurrencia y consecuencias contenidas.

La evaluación de la amenaza por inundación, por su parte, presenta una particularidad relacionada con la escala de trabajo: tiene un carácter más regional y debe analizarse en el contexto de cada cuenca hidrográfica y cada río particular, y no obedece a una escala (urbana) específica; siendo competencia posiblemente de procesos de ordenamiento ambiental a escalas más amplias. Por este motivo, como en esta investigación se hace énfasis en el análisis del entorno urbano, se analiza la amenaza que a juicio del autor representa un claro determinante para el ordenamiento territorial a escala urbana: los procesos de remoción en masa.

1.5.2. Necesidad de adaptación de metodologías e incorporación de factores antrópicos

No existe un estándar en cuanto a procedimientos y técnicas para modelar amenazas con fuerte incidencia en áreas urbanas como los deslizamientos e inundaciones, y faltan mecanismos para garantizar que los gestores de riesgo puedan entender y utilizar ampliamente los resultados derivados de evaluaciones de amenaza y riesgo. Esta situación se hace aún más crítica cuando en estos procesos, además de los elementos naturales, tiene alta importancia la intervención antrópica y el contexto.

La ocurrencia de deslizamientos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas y la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad. Bajo este panorama, existe un fuerte componente antrópico, representado en factores como la localización y características de las carreteras, canales, tubería, oleoductos y demás elementos, producto de la acción humana; presencia o ausencia de zonas duras o pavimentadas; las áreas de zonas verdes; la localización de sumideros y demás elementos de drenaje y los sitios de descarga de los diversos colectores de agua; alteración de la cobertura vegetal (Suárez, 2009), entre otros importantes condicionantes que reflejan la presencia humana en el territorio y deben considerarse, preferiblemente de manera cuantitativa en un modelo de susceptibilidad o amenaza.

En el caso Colombiano, la reciente normativa destaca además la falta actual de reglamentación en cuanto a metodologías de evaluación de amenazas y riesgo y la necesidad de buscar estándares, dado que hasta el momento, cada municipio ha adoptado metodologías dispares, en muchos casos cualitativas, subjetivas y no comparables.

1.5.3. Necesidad de incorporación de estudios de amenaza y riesgo en el OT

Como un mecanismo para enfrentar las pérdidas potenciales por fenómenos naturales, la Planificación y Ordenamiento Territorial, a través del planteamiento de acciones de prevención y mitigación en función de una “imagen objetivo” de la ciudad, debería poder prever eventos con niveles de daños grandes y frecuencias de excedencia altas. Esta forma de visualizar el riesgo es útil

para resaltar la importancia que tiene la Planificación y Ordenación del Territorio, a través del uso racional del suelo y los recursos.

La inclusión de la gestión del riesgo, no sólo en el ordenamiento territorial sino también en toda la planificación local, se convierte en una estrategia necesaria y un instrumento idóneo que permite actuar sobre el territorio para prevenir desastres y reducir riesgos, y conduce a cada municipio a un desarrollo continuo, orientado a mejorar las condiciones de vida de la población.

El impacto de los deslizamientos puede reducirse considerablemente si las zonas susceptibles se identifican y se señalan, y esto se acompaña de medidas de ordenación de territorio, estableciendo usos del suelo adecuados y acordes al entorno. Para tal fin, se requiere incrementar los esfuerzos para hacer posible la zonificación de deslizamientos, evaluación de susceptibilidad y amenaza para la determinación del riesgo, mejor documentado y reproducible, y buscar mecanismos para transmitir la información científica generada, asociada a las normas de planificación, códigos de construcción y planes de defensa civil.

1.6. Impacto esperado

La tarea de sugerir procesos de gestión de riesgos ante movimientos en masa en entornos urbanos andinos debe contribuir al cambio en algunas percepciones:

Los fenómenos naturales peligrosos y recurrentes son difíciles de pronosticar, de prevenir y más aún de controlar. Esta concepción, que históricamente ha dado origen a políticas y acciones dirigidas a actuar sólo en el momento que muchos fenómenos ocurren, debe modificarse a un enfoque en la gestión del riesgo previo al manejo de emergencias.

Los desastres son naturales. Por ello, al incorporar en la planificación del desarrollo el análisis de riesgos, se estará promoviendo la adopción de procesos de desarrollo orientados, adecuados a la realidad urbana de cada unidad territorial, y con la visión de una imagen objetivo de cada unidad territorial.

Los fenómenos naturales son momentáneos, y después de ocurrido el evento se presenta la “curva del olvido” en las instituciones públicas como privadas y la población de las áreas afectadas.

Los desastres cotidianos y recurrentes, con afectaciones pequeñas, como los deslizamientos, son menos importantes que otros tipos de fenómenos de mayor alcance y menor frecuencia de ocurrencia.

1.7. Objetivo principal

Aplicar, adaptar y validar diferentes metodologías de modelización al proceso de evaluación de susceptibilidad, amenaza y riesgo por deslizamientos, en entornos andinos, para generar modelos adecuados para ser incluidos en los mecanismos de ordenamiento territorial.

1.8. Objetivos específicos

Analizar metodologías cuantitativas para elaborar mapas de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra aplicables a contextos andinos.

Adaptar las metodologías para zonificación de susceptibilidad y amenaza frente a deslizamientos, mediante la incorporación de variables de contexto a los análisis, para reflejar la intervención antrópica en el territorio.

Aplicar diferentes metodologías para generar modelos de susceptibilidad frente a deslizamientos de tierra en dos áreas de la zona andina.

Proponer mecanismos para incorporar la amenaza y riesgo por deslizamiento en los instrumentos de planificación territorial, lo cual incluye la incorporación del factor detonante pluviométrico a los análisis de susceptibilidad, como medio para la definición del elemento temporal de la amenaza, y explorar alternativas para la valoración de pérdidas por deslizamiento.

Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Áreas de Estudio

La Figura 6 presenta la localización de las áreas que se utilizarán para aplicar las metodologías descritas en el presente capítulo de esta memoria. Se trata de dos unidades territoriales de diferente escala, localizadas en el departamento de Caldas, en el flanco occidental de la cordillera central de Colombia, perteneciente a la cadena montañosa de Los Andes. De una parte, la cuenca hidrográfica del río Chinchiná, y de otra, el perímetro urbano de la ciudad de Manizales. Las dos áreas reflejan las características típicas de los entornos andinos de los cuales forman parte, y albergan segmentos considerables de población.

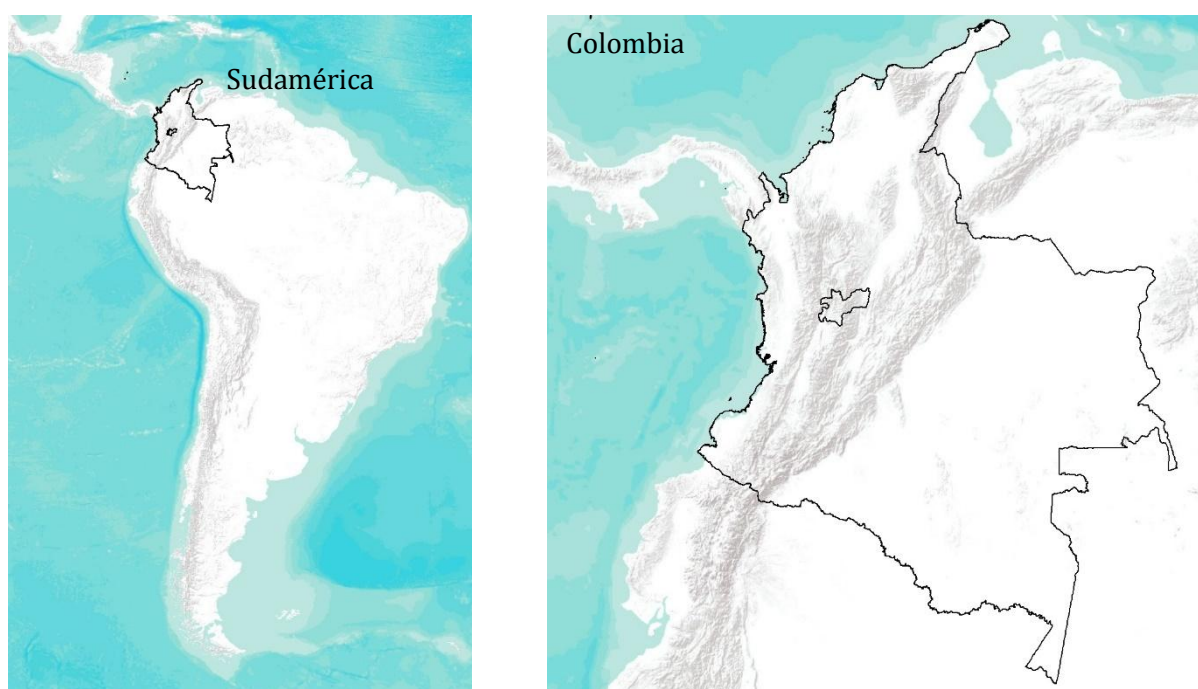




Figura 6. Localización general de las áreas de estudios

El relieve del continente sudamericano se caracteriza por una franja continua de altas montañas al oeste y amplias llanuras interrumpidas por elevaciones aisladas o mesetas escalonadas hacia el este (GEMMA, 2007).

La cordillera de Los Andes, columna vertebral del territorio sudamericano, se extiende desde los Andes Antárticos (70°S) hasta la región andina de Venezuela (10°N). Esta variación latitudinal está asociada en la región andina a variaciones muy grandes de altura, clima, vegetación, características morfo estructurales, sismicidad y densidad de población. A pesar de estas diferencias, tienen en común su relieve y actividad tectónica, que ante el efecto de factores detonantes y la fuerza de gravedad, hace que los movimientos en masa sean uno de los procesos activos más frecuentes (GEMMA, 2007).

En las zonas elevadas, la retracción de los glaciares, debido al calentamiento global, descomprime las laderas, produciendo deformaciones gravitacionales profundas, que evolucionan a flujos en sus partes distales; genera avalanchas de hielo y rocas, flujos de detritos por rotura de diques morrénicos o lagos glaciales (GEMMA, 2007).

Las condiciones periglaciares favorecen la producción de detritos de ladera por congelifracción, que se movilizan por gelifluxión o como flujos crionivales (GEMMA, 2007).

El rápido ascenso tectónico Plio-Cuaternario y la consecuente profundización de la red hídrica favorecen el empinamiento de las laderas, que socavadas en su base por erosión fluvial desencadenan deslizamientos (GEMMA, 2007).

Las vibraciones sísmicas desencadenan gran cantidad de movimientos en masa: caídas, deslizamientos, flujos, propagaciones laterales, así como avalanchas de rocas, conocidas por los habitantes de los Andes por su volumen, movilidad, velocidad y área que cubren sus depósitos

Las condiciones climáticas reinantes en la cordillera de Los Andes en áreas tropicales y subtropicales favorecen la meteorización de las rocas superficiales y el desarrollo de suelos profundos, los cuales, saturados por las torrenciales precipitaciones tropicales o sacudidos por fuertes y frecuentes vibraciones sísmicas, generan movimientos en masa múltiples y flujos de lodo y detritos, de gran alcance y potencial destructivo.

Como componente adicional a las condiciones naturales, la distribución de la población en la región andina es aleatoria, pero donde ella se ubica, la deforestación y ocupación de las laderas rompe el equilibrio natural y favorece con frecuencia la desestabilización. Tal es el caso de algunas ciudades andinas como Lima, Quito, Bogotá, Manizales, entre otras.

2.1.1. Cuenca del río Chinchiná

La cuenca del río Chinchiná está Localizada en la región central del Departamento de Caldas Colombia. Comprende los municipios de Manizales, Villamaría, Neira, Chinchiná y Palestina, en una zona de gran importancia desde los puntos de vista social, económico y por su contexto ecológico (CORPOCALDAS, 1999).

En esta región se concentra aproximadamente el 50% de los habitantes del departamento de caldas, el 85% ubicados en la zona urbana y el resto en la zona rural, en una región correspondiente aproximadamente al 20% del área departamental (113.264 Ha) (CORPOCALDAS, 1999). Económicamente constituye una de las áreas más importantes del país, por ser parte de la zona de máxima producción cafetera.

Desde el punto de vista ecológico, la cuenca se extiende desde los puntos más elevados de la cordillera central, nacimiento de los ríos claro, Chinchiná y Guacaica, a los 5200 m.s.n.m ubicados en el volcán activo del Nevado del Ruiz, y disminuyendo en altura hasta los 800 m.s.n.m, sector en el que el río Chinchiná entrega sus aguas al Río Cauca (CORPOCALDAS, 1999).

En general, la cuenca presenta una historia de eventos de deslizamientos, los cuales obedecen principalmente a los detonantes pluviométrico y sísmico. La ocurrencia de estos fenómenos depende de factores como: el estado de la roca y la clase de suelo, la meteorización y erosión, la actitud de las discontinuidades relictas y fracturas, la intensidad y cantidad de lluvia, la fuerza sísmica, y la actividad humana expresada en modelados y sobrecargas, en el manejo de las aguas, en talas y cambios de coberturas, en vertimientos de aguas, etc. En la cuenca del río Chinchiná, como ocurre en la región Andina del país, a causa del carácter bimodal del clima, son más probables los

movimientos masales en las dos temporadas lluviosas del año: después de marzo 21 hasta finales de junio, y después de septiembre 21 hasta finales de noviembre.

El principal elemento detonante para la inestabilidad de laderas en la cuenca lo constituye la sobresaturación por lluvias (2000 mm precipitación media anual aproximadamente) y la pérdida de soporte lateral, asociado con excavaciones de carreteras o socavación de los ríos de régimen torrencial y la explotación de materiales de arrastre. Las principales variables contribuyentes a la erosión lo constituyen el cambio en el uso del suelo de coberturas densas a cultivos limpios, la deforestación en zonas de fuerte pendiente y la apertura de vías y caminos. Dentro de los factores intrínsecos que favorecen la inestabilidad se destaca el grado de trituración de la roca en zonas de falla, la disposición de las discontinuidades, la longitud y el ángulo de la pendiente, el contacto entre unidades de diferente permeabilidad o la interface existente entre roca meteorizada-roca sana (CORPOCALDAS, 1999).

2.1.2. Municipio de Manizales

Surge como una de las consecuencias que deja el fenómeno de Colonización Antioqueña, que se dio en Colombia en el siglo XIX, buscando una expansión hacia el sur para la provincia de Antioquia, extendiéndose a los lados de la vertiente del río Cauca, zona fértil gracias a sus suelos de origen volcánico, clima favorable y la presencia de innumerables fuentes de agua (Valencia 1990). Pero caracterizada por una topografía particular, de pendientes pronunciadas, suelos inestables y, adicionalmente, fuerte sismicidad.

El factor determinante para la ubicación del sitio de emplazamiento de Manizales fueron los caminos que generaban una conexión eficiente con las otras regiones del país. Se tenía como meta fundamental encontrar un lugar donde se pudiera unir en línea recta las provincias de Antioquia y Cauca, regiones de marcada importancia para la época (Gutiérrez 1919).

La ciudad nace en una meseta plana que hoy en día coincide con el centro histórico y comienza a extenderse a lo largo de la cresta de la montaña, hacia la periferia norte y hacia la periferia sureste aprovechando que se trataba del terreno relativamente plano disponible.

Con el crecimiento de la ciudad y la región como núcleo productor de Café de marcada importancia nacional, Manizales se convierte en los primeros años del siglo XX en un polo atractor de población rural, quienes ven en sus empresas y actividades, la oportunidad de mejorar la situación familiar. El crecimiento demográfico en estos años es vertiginoso; para el año de 1918 la población asciende a 43.202 habitantes (Restrepo 1995) incrementándose en 75% con relación a 1.905, y en 1.925 se tienen ya 50.000 habitantes.

Ante la presencia de urbanizadores construyendo sin previa planificación y utilizando la estrategia de construir primero y dotar posteriormente a los barrios de servicios públicos, en el

marco del primer centenario, en 1940, el Concejo municipal de la ciudad invitó al prestigioso urbanista Karl Brunner, para que planteara alguna solución a estos problemas. Como respuesta se sugirió trazar nuevas avenidas y urbanizaciones ajustadas a la topografía, evitar los cortes y rellenos del terreno, obsesivos para los Manizaleños, y se aconsejó establecer sectores separados entre sí por áreas boscosas en las cuales se debería prohibir construir.

Aproximadamente a partir de 1940 la ciudad sufre un proceso acelerado de poblamiento; pasa de tener 51.025 habitantes en 1938, a tener 190.036 habitantes en 1964: en 26 años la población se incrementa en un 372%; se trata del período de más acelerado poblamiento que ha sufrido la ciudad en su historia. A partir de los años 30 se empieza a dar un proceso de acelerada migración, que va a durar varias décadas, especialmente de poblaciones rurales por varias causas. Al principio, por las necesidades de empleo: La crisis de 1929 con la consecuente caída en el precio internacional del café dificulta la exportación, genera la quiebra de varios productores de grano, y propicia el aumento del sector industrial de la ciudad, pues también se hace difícil importar productos de consumo, que deben empezar a fabricarse en el medio local (Chardon, 2002). Posteriormente, un segundo factor de migración se da a raíz de la denominada violencia partidista nacional entre los dos partidos políticos tradicionales: conservadores y liberales, que obliga a los campesinos a acelerar su desplazamiento a los centros urbanos. Figura 7 muestra este fenómeno de incremento de población en el casco urbano y la reducción de la población rural desde 1938.

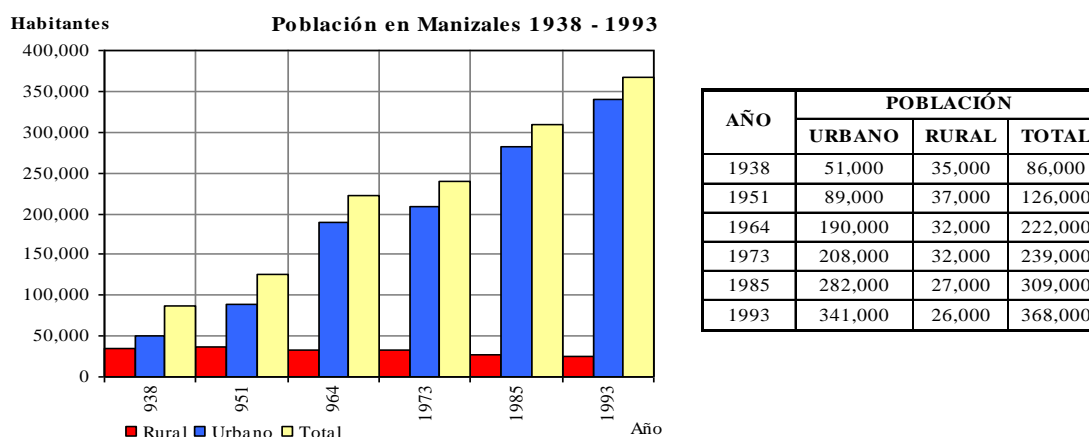


Figura 7. Población de Manizales entre los años 1938 a 1993
Fuente: DANE (1994).

A partir de 1963, la presencia de invasiones (viviendas informales) desde décadas anteriores, forma parte de la ciudad en lo que a su perímetro se refiere, y comienza una nueva etapa de utilización de la Bambusa Guadua como material básico de construcción popular y espontánea, unido a un urbanismo improvisado y una arquitectura informal, que da como resultado el poblamiento de laderas poco propicias para la formación de barrios.

El barrio Galán surge como un asentamiento espontáneo al borde de la antigua carretera a Neira, en el sector norte de la ciudad, que se va consolidando con el paso del tiempo; hacia los años 1972 y 1973 se comienzan a notar las implicaciones del desordenado asentamiento en terrenos inapropiados con la recurrencia de deslizamientos que dejan damnificados. Precisamente los deslizamientos persistentes en períodos lluviosos en Manizales, surgen en esta época. Según registros oficiales de la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres OMPAD entre 1948 y 1962 se presentan 25 deslizamientos, con 45 muertos y 65 heridos. El problema aumenta notoriamente en la medida en que se incrementan la urbanización y la presión poblacional; en el período 1963-1977 se presentan 163 eventos, causantes de 170 muertes y 49 heridos. Se empieza a evidenciar la fuerte relación existente entre necesidades de espacio, urbanización popular, adecuación de terrenos y deslizamientos.

Los barrios ilegales o piratas se ubican en los sectores periféricos, “en las faldas más inaccesibles y empinadas de la ciudad, hacia el norte, sur, oriente y occidente” (Esguerra 1993), sobre terrenos altamente deleznable, sin acueducto ni alcantarillado, con calles angostas en las cuales caen desagües contaminados, sin espacio público, con casas malolientes, hacinadas y mal ventiladas. Todo esto en contra de la reglamentación urbana que proferiera el concejo municipal después del incendio de 1925 (Robledo 1996), que además propugnaba por mantener las “cualidades intrínsecas del suelo y su comportamiento mecánico” y normalizaba “técnicas constructivas y materiales que proporcionaran la máxima seguridad” (Aprile-Gnisset 1992).

En 1981, se crea para Manizales el primer código de construcciones sismorresistentes, como consecuencia de un terremoto ocurrido en 1979 que afectó especialmente el sector oriental de la ciudad. El Decreto 1400 de 1984, se convierte en una de las primeras medidas no estructurales de prevención de desastres y planificación urbana en el país, y establece las bases para la correcta construcción de viviendas en zonas de fuerte sismicidad. Como consecuencia de esta medida se da pleno desarrollo al mito de la “casa de material”, es decir se renuncia culturalmente a la tecnología de madera o bahareque, se construye masivamente en concreto reforzado y mamposterías de ladrillo o bloque de cemento y se acentúa la tendencia a la rigidización extrema de las estructuras, y el consecuente aumento de peso y presión sobre el terreno.

En esta época se hace evidente el trabajo continuo de la Corporación Autónoma Regional de Caldas, CORPOCALDAS, antes CRAMSA, en el ámbito de la mitigación de riesgos, con el manejo técnico paisajístico de áreas de protección de laderas afectadas por problemas de erosión; básicamente mediante sistemas de canalización de aguas superficiales, perfilado de taludes, drenado y reforzamientos de los mismos mediante pantallas ancladas de concreto, muros de gaviones, muros de contención y otras estructuras similares, que se agrupan bajo el nombre de Obras Para el Control de la Erosión, tema en el cual la ciudad va a ocupar desde ese entonces un

puesto privilegiado a nivel nacional en cuanto a investigaciones, conocimiento, y aplicación de estas tecnologías.

Para el inicio del siglo XXI, el municipio de Manizales, cumpliendo con la Ley 388 de 1997 de Ordenamiento Territorial, está regido en su desarrollo urbanístico, arquitectónico y ambiental por su Plan de Ordenamiento Territorial, presentado por primera vez en el año 2001, y con lineamientos para el desarrollo futuro de la ciudad de los próximos 9 años. En el 2003 se hace una revisión del Plan de Ordenamiento Territorial; entre otras sugerencias, se plantea la actualización de la planimetría existente en la Alcaldía de la ciudad y se avanza de la mano de Corpocaldas en el estudio de las zonas de amenaza por deslizamiento y el inventario de las obras geotécnicas realizadas por esta entidad, debido principalmente al aumento de las lluvias y sucesos de deslizamientos que llegan al número de 90 en 2003, con el índice más alto de muertos por año hasta el momento (41 muertos y más de 100 heridos).

Además de estas condiciones gestadas históricamente, también existen particularidades geológicas, geomorfológicas y climáticas, que configuran características físicas y naturales generadoras de amenaza.

2.1.3. Aspectos Geomorfológicos, Topográficos Y Pluviométricos

La topografía regional ha sido modelada por las erupciones que han tenido lugar en el Macizo Volcánico Ruiz-Tolima, sobre la cordillera central colombiana, en la Región montañosa de Los Andes. El relieve es montañoso y ondulado, con pendientes predominantes que varían entre el 20 y el 100%; los terrenos presentan diferencias de nivel que pueden llegar hasta 220 metros entre sus partes más altas y más bajas.

Los drenajes principales de la ciudad son dos; el Río Chinchiná, ubicado al sur y la Quebrada Olivares, ubicada al norte. La ciudad, en su centro histórico, aparece como una meseta erguida sobre estos dos ríos, con una parte plana que coincide con una de sus calles principales (carrera 23) y unas laderas que se van agudizando hasta llegar a los cauces mencionados. Existen adicionalmente varios drenajes naturales que tributan a la Quebrada Olivares y al Río Chinchiná.

La Ciudad se ve amenazada principalmente por fenómenos relacionados con la actividad sísmica, la actividad volcánica y movimientos en masa. Las características geológicas y topográficas particulares, hacen que Manizales sea una zona susceptible a sufrir fuertes procesos denudativos y de flujos de escombros; siendo amplificada esta situación por la intervención antrópica a través de la adecuación de terrenos y las características físicas y mecánicas del suelo.

Los procesos de inestabilidad en la Ciudad son provocados principalmente por erosión que tiene como causa principal la escorrentía superficial. Principalmente se trata de: erosión en surcos, erosión en cárcavas, escurrimiento laminar, socavación lateral, erosión acelerada o antrópica.

Los fenómenos de remoción en masa más comunes son movimientos de magnitud media a baja (menores de 5000 metros cúbicos). Generalmente se trata de reptación o deslizamientos ocasionados por la infiltración de aguas superficiales y la saturación del terreno. En general, es posible decir que la estabilidad de taludes y laderas en Manizales está gobernada por variables topográficas, geológicas, biológicas, climáticas y antrópicas.

Dentro de los factores que determinan la inestabilidad de los suelos, cabe destacar la acción del agua: Los suelos de Manizales presentan exceso de humedad, generado por la alta pluviosidad, la permeabilidad de dichos suelos y las aguas subterráneas controladas por los contactos entre estratos. Adicionalmente, la red natural de drenajes se ha visto alterada por los procesos urbanísticos (con mayor intensidad a partir de los años 70), al realizar llenos y cortes para la adecuación de terrenos dentro de las cuencas, muchas veces sin considerar procedimientos técnicos adecuados. Se presentan también zonas de alta infiltración y saturación por obras inadecuadas, producto del proceso acelerado de urbanización en los últimos años, como ejemplo, se citan los sitios de entrega de alcantarillados en la parte media de laderas pendientes, que generan procesos erosivos. La erosión natural del agua de escorrentía produce profundización de los cauces y socavación lateral.

En cuanto a cifras relacionadas con aspectos hidrometeorológicos, la temperatura media es de 18°C, la mínima promedio de 12°C y la máxima promedio de 22°C. Los períodos secos son dos, entre enero-marzo y junio-agosto; el mes más seco es junio con 74% de humedad relativa, y el más húmedo octubre, con 81%.

Los datos climáticos particulares de la ciudad se han deducido para este trabajo de un análisis realizado por el autor a la serie histórica de lluvias diarias registradas en la estación meteorológica Agronomía, instalada en predios de la Universidad de Caldas y operada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ desde el año 1956, como se presenta en la Figura 8.

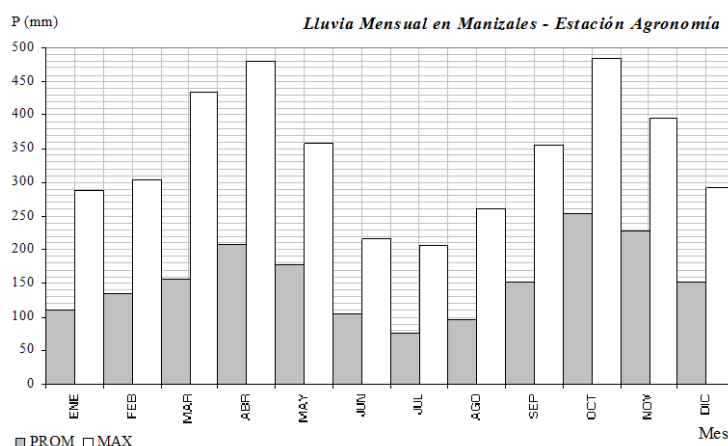


Figura 8. Aspectos Pluviométricos Históricos de La Ciudad

Como es característico de esta región andina colombiana, dada su ubicación en la Zona de Convergencia Intertropical ZCIT, se presenta una distribución de precipitaciones de tipo bimodal, con dos períodos lluviosos en el año; uno máximo hacia el mes de octubre con 253 mm en promedio, y otro un poco menor hacia el mes de abril, con 208 mm. El mayor nivel de precipitación mensual registrado en la estación de Agronomía es de 485 mm para octubre de 1969, seguido de 480 mm en abril de ese mismo año. La Figura 9 presenta el valor promedio de cada mes durante todo el periodo de registro y los valores máximos mensuales establecidos por la World Meteorological Organization, para tener una referencia.

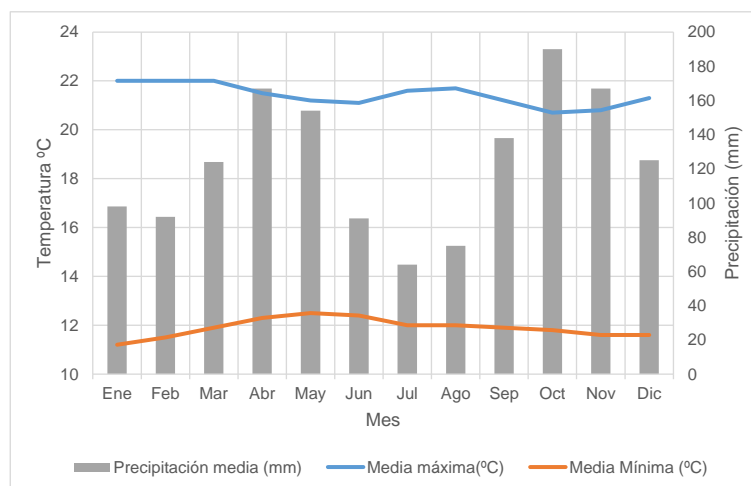


Figura 9. Condiciones climáticas históricas en Manizales
Fuente WMO <http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=875>

En cuanto a la extensión de los dos períodos lluviosos en el año, a partir de la Figura 10, elaborada con el promedio de los valores diarios para cada año de registro, es claro que el primer período lluvioso es más extenso, empieza en febrero y termina en julio; mientras el segundo, aunque más corto, es más intenso y termina después de diciembre. Los máximos estarían situados hacia principios del mes de abril (día 100 del año, aproximadamente) para el primer semestre, y hacia finales del mes de octubre (día 320) para el segundo semestre. Esta tendencia se repite para los valores máximos (Figura 11).

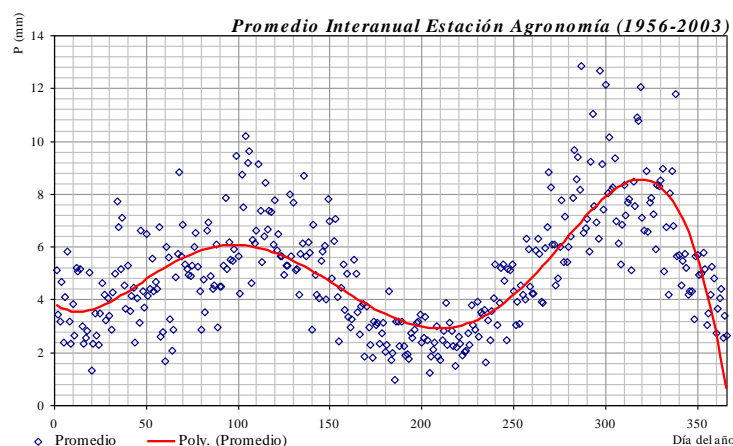


Figura 10. Distribución de Precipitaciones (promedios) en el año

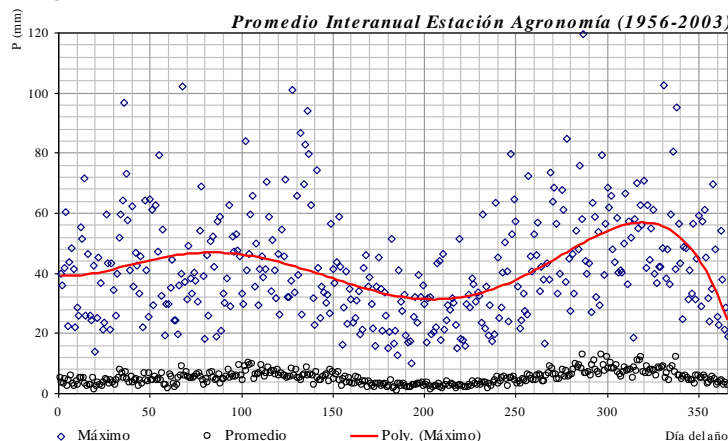


Figura 11. Distribución de Precipitaciones (Máximos) en el año

La distribución anual de precipitación muestra valores que oscilan entre 1253 mm (1991) y 2627 mm (1999), seguramente con máximos y mínimos determinados por dinámicas macroclimáticas y fenómenos como El Niño y La Niña, cuyo análisis escapa al alcance de este trabajo. El promedio anual registrado para la ciudad es de 1847 mm para los 47 años de registro (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El panorama anterior muestra una ciudad que por sus características físicas naturales, por su evolución urbanística, sus patrones de ocupación del territorio y dinámicas de segregación socioespacial, constituye un ejemplo típico de procesos de poblamiento en ciudades latinoamericanas asentadas en las laderas de la cordillera de los Andes. Se trata de un laboratorio natural para estudiar las complejas interacciones entre los diferentes factores y mecanismos que generan riesgos, especialmente enfocados al caso de deslizamientos. A partir de un análisis de este tipo, se podrán incorporar políticas más precisas y elementos de planificación concretos, que pensados a futuro, constituyan opciones de salida al bucle negativo de vulnerabilidad y riesgo que ofrecen en la actualidad como tendencia muchas de las ciudades andinas.

La ciudad de Manizales, a través de la gestión realizada por las entidades que conforman el Sistema Municipal para la Prevención y Atención de Desastres (o de gestión de riesgos, más recientemente), ha venido consolidando desde la década del 70 una serie de prácticas y políticas públicas en gestión integral de riesgos que han hecho que esta ciudad sea reconocida internacionalmente por el manejo integral de riesgo. (PREDECAN: 2009).

En Manizales, es evidente una capacidad local permanente y continua que permite diagnosticar y analizar los diferentes riesgos presentes, para formular estrategias y procesos de planificación ligados al desarrollo local. Asimismo, se identifica una articulación interinstitucional con actores locales y externos que ha permitido a la población realizar e implementar diversas acciones en pro de la disminución del nivel de riesgo de las diferentes comunidades de la ciudad. (PREDECAN: 2009)

La ciudad de Manizales ha venido desarrollando y consolidando sus prácticas y políticas públicas en gestión integral del riesgo desde hace varios años, en especial desde la década de los años 70. En sus inicios se hizo énfasis en intervenciones estructurales con obras de mitigación del riesgo, y la visión que se tenía era la de la intervención física de la amenaza o el riesgo para poder reducirlo.

Posteriormente, en la década de los años 80, y hasta mediados de los años 90, se empezaron a desarrollar avances en aspectos normativos; el enfoque fue dirigido hacia las reglamentaciones de usos del suelo, principalmente relacionadas con la planificación. A mediados de la década de los años 90 y más recientemente, en Manizales se empiezan a realizar intervenciones integrales que propenden a la disminución de los componentes o factores de la vulnerabilidad frente al tema de riesgo y su gestión de manera sistémica.

En Manizales se reflejan estas tendencias de la evolución de los enfoques de intervención a través de los diferentes componentes que hacen parte de la evolución en la actual gestión integral del riesgo en la ciudad. A pesar de seguir afectada por diversos tipos de desastres, presentes desde su fundación, y continuar expuesta a diversas amenazas naturales, socionaturales y de origen antrópico, las intervenciones que se realizan son cada vez más complementarias entre sí en aras de disminuir el riesgo.

Actualmente, la ciudad cuenta con varios procesos bandera en el país y la región, enfocados a la identificación del riesgo, la mitigación, la prevención, la preparación para emergencias y la gestión financiera del riesgo que son el resultado de trabajos interdisciplinarios, interinstitucionales y comunitarios, innovadores y ejemplares.

Uno de los puntos importantes de las experiencias de Manizales radica en la notable demostración de voluntad política que se refleja en la toma de decisiones, la implementación y las inversiones que hace la administración municipal en forma específica para la gestión de riesgos y como una de las políticas o estrategias de la planificación del desarrollo. De esta forma, se ha alcanzado un alto nivel de integración de acciones en la implementación de la gestión del riesgo de la ciudad desde diversas perspectivas debidamente coordinadas, donde se pueden identificar actividades relacionadas con cuatro políticas públicas específicas de gestión del riesgo:

- La identificación del riesgo,
- La reducción del riesgo (a través del control o previsión del riesgo y de las intervenciones prospectivas y correctivas del riesgo),
- El manejo de desastres, y
- La protección financiera.

Producto de ello, se ha logrado una gestión con resultados eficientes y efectivos por parte de la administración municipal, el sector privado, la academia y la misma comunidad.

2.2. Marco conceptual

El proceso de evaluación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo por deslizamiento sigue un marco de trabajo como el esquematizado en la

Figura 12. Se debe iniciar con una etapa de recopilación de información disponible, que de cierta forma, condiciona los pasos sucesivos del proceso. Se destacan cuatro tipos de información de entrada necesaria:

- 1) se debe contar con datos asociados a eventos previos, específicamente con un inventario con la localización de deslizamientos pasados, y en lo posible, con datos asociados a sus características;
- 2) se requieren datos contextuales del área de estudio, representados por información de factores naturales (topografía, pendiente, curvaturas, geología, usos del suelo), factores sociodemográficos (datos económicos, densidades poblacionales, etc), variables relativas al suelo (geología, geomorfología, tipos de suelo, coberturas, etc), y otras variables que reflejen la influencia antrópica en el territorio (vías, infraestructuras de servicios públicos). Estos factores se han denominado “de propensividad”, pues se entienden como todos aquellos condicionantes que influyen en que una zona sea más o menos propensa a presentar deslizamientos;
- 3) información de eventos detonantes. Especialmente hay dos tipos de eventos que detonan deslizamientos: sismos y precipitación. Se debe tener información histórica que permita inferir datos de frecuencia de ocurrencia para incorporar a los estudios;
- 4) datos de exposición. Referidos a la cantidad y valoración de los activos expuestos en determinada área, y a las personas expuestas.

A partir de la información de eventos previos y factores de propensividad se construyen los modelos de susceptibilidad mediante diferentes métricas, obteniendo una “probabilidad” de tipo espacial, que zonifica el área según su mayor o menor propensividad a presentar deslizamientos, y constituye una característica “intrínseca” al área. El análisis de los eventos detonantes implica la incorporación de la frecuencia de ocurrencia a los análisis, o en otras palabras, la probabilidad temporal. Con los dos productos anteriores es posible construir un modelo de amenaza por deslizamiento, que indique espacial y temporalmente la probabilidad de ocurrencia de nuevos eventos. Como complemento, a partir de información sobre exposición disponible, pueden elaborarse escenarios de consecuencias, que constituyen el punto de partida para estudios detallados de riesgo y toma de decisiones. No obstante, la manera de incorporar estos resultados al proceso de ordenamiento territorial será expuesta con mayor extensión en el Capítulo 4 de la presente memoria.

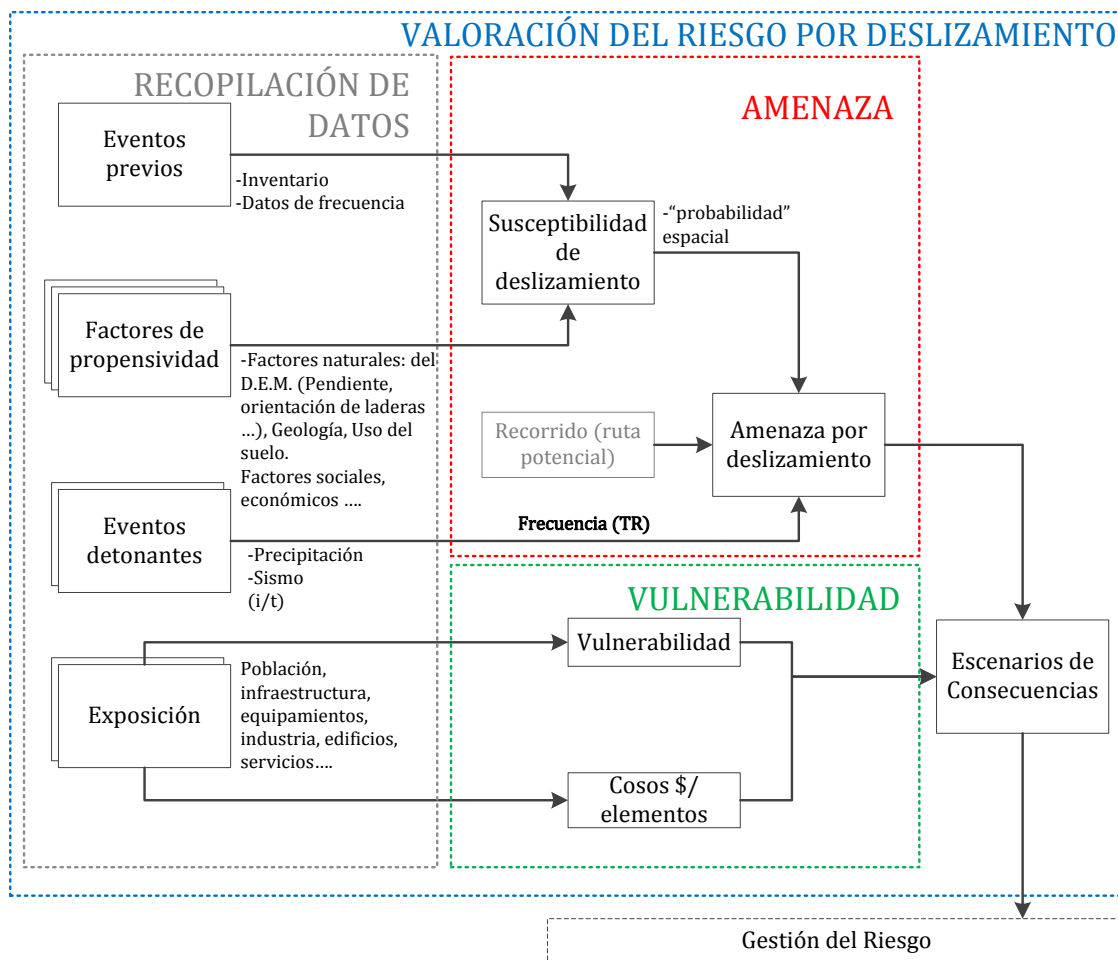


Figura 12. Esquema conceptual del cálculo de riesgo por deslizamiento

En cuanto a los modelos de cálculo de susceptibilidad, que constituyen una etapa clave del proceso, se sigue un esquema similar al de la Figura 13, en el cual, a partir de la información sobre los factores de propensividad y el inventario de eventos previos, es posible construir diferentes modelos para obtener como producto la valoración de la susceptibilidad a deslizamientos en términos cuantitativos.

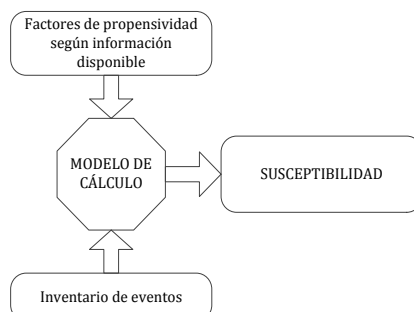


Figura 13. Esquema conceptual para elaboración de modelos de susceptibilidad

2.3. Inventario de deslizamientos

Un inventario de deslizamientos es un mapa que registra la localización, y cuando son conocidos, también datos de la ocurrencia y tipo de movimientos en masa que han dejado rastros en el área. (Pašek, 1975; Hansen, 1984a, 1984b; McCalpin, 1984; Wieczorek, 1984; Guzzetti et al., 2000).

Los mapas de inventario se pueden elaborar siguiendo diferentes técnicas (Guzzetti, 2006); la selección de una técnica específica depende del propósito del inventario, la extensión del área de estudio, la escala de trabajo, la resolución y características de la información geográfica disponible (fotografías aéreas, imágenes satelitales, imágenes LiDAR, datos de elevación, etc). La capacidad técnica y experiencia de los investigadores y los recursos disponibles también influyen (Guzzetti et al., 2000; van Westen et al., 2006).

Normalmente se obtiene un solo mapa para acopiar los diferentes tipos de movimientos en masa en el área; como alternativa se puede preparar un set de mapas por tipo de movimiento.

En cuanto a insumo para la preparación de mapas de susceptibilidad, amenaza y riesgo, el inventario de deslizamientos es muy importante, pues incluye la información sobre la localización de los sitios dónde han ocurrido previamente movimientos en masa, y por tanto, constituye la base para inferir características comunes del terreno en donde tienen lugar procesos de inestabilidad. Desde el punto de vista numérico, las características de los puntos/zonas contenidos en el inventario, representados por los diferentes factores discutidos en la sección precedente, constituyen los valores de calibración/parametrización de los diferentes modelos posibles para la representación de la susceptibilidad a deslizamientos.

2.4. Factores de propensividad

No existen guías universales para la selección de factores en la evaluación de susceptibilidad a deslizamientos (Ayalew et al., 2005). Puede existir un parámetro importante que controle la estabilidad en cierta zona, pero no en otra. La selección de los factores causales requiere considerar las características del área de estudio y la disponibilidad de datos. Según Ayalew (2005), los factores seleccionados deben ser operacionales, representar la zona completa, ser no uniformes, no redundantes y medibles.

El supuesto principal que se utiliza para el proceso de modelización es que los deslizamientos futuros tendrán lugar bajo condiciones similares a los deslizamientos pasados. Adicionalmente, se supone que todos los factores causantes importantes son conocidos y están incluidos en la base de datos y todos los eventos de inestabilidad se encuentran debidamente registrados en el inventario. En esta propuesta se ha preferido utilizar el nombre de *factores de propensividad*, en lugar de *causales*, pues realmente se trata de factores intrínsecos de un área que definen qué tan propensa

es cada zona a la presencia/ausencia de deslizamientos. No existen factores causales de deslizamientos enumerables, se trata de una combinación entre factores de propensividad y la presencia de un factor detonante, que dependen de cada contexto, y en conjunto generan los movimientos en masa.

Hoy en día, gracias a la existencia de datos provenientes de sensores remotos y otras fuentes en formatos digitales, y a la utilización de herramientas específicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible preparar diferentes capas temáticas, correspondientes a factores causales de deslizamientos en una región (Gupta and Joshi 1990; Van Westen 2000; Saha, Gupta, and Arora 2002, Saha et al. 2005a; Saha et al. 2005b) con menor esfuerzo y tiempo del requerido hace unas décadas.

Los SIG permiten la extracción de parámetros morfométricos e hidrológicos a partir de un Modelo de Elevaciones Digital (DEM), que de otra manera serían difíciles de obtener. De esta manera, es factible incluir en el análisis parámetros como la pendiente del terreno, aspecto de las laderas, convexidad, áreas de drenaje, entre otras variables (Santacana et al. 2003), mediante cálculos sencillos, en su mayoría automatizados en los diferentes paquetes de SIG disponibles. Otra de las razones que hacen recomendable el uso de SIG es la posibilidad de actualizar la información continuamente, en la medida en que esta se encuentre disponible (Fell et al. 2008).

Un elemento innovador en esta propuesta está constituido por la inclusión de la influencia antrópica, a través de ciertos factores de propensividad, haciendo que el análisis no se limite solo a lo natural, como ha sido característico de los estudios de susceptibilidad a deslizamientos tradicionales. La

Figura 14 presenta una serie de factores de propensividad posibles y sus interrelaciones, clasificadas en dos grandes grupos: los factores naturales y los que son generados por influencia antrópica.

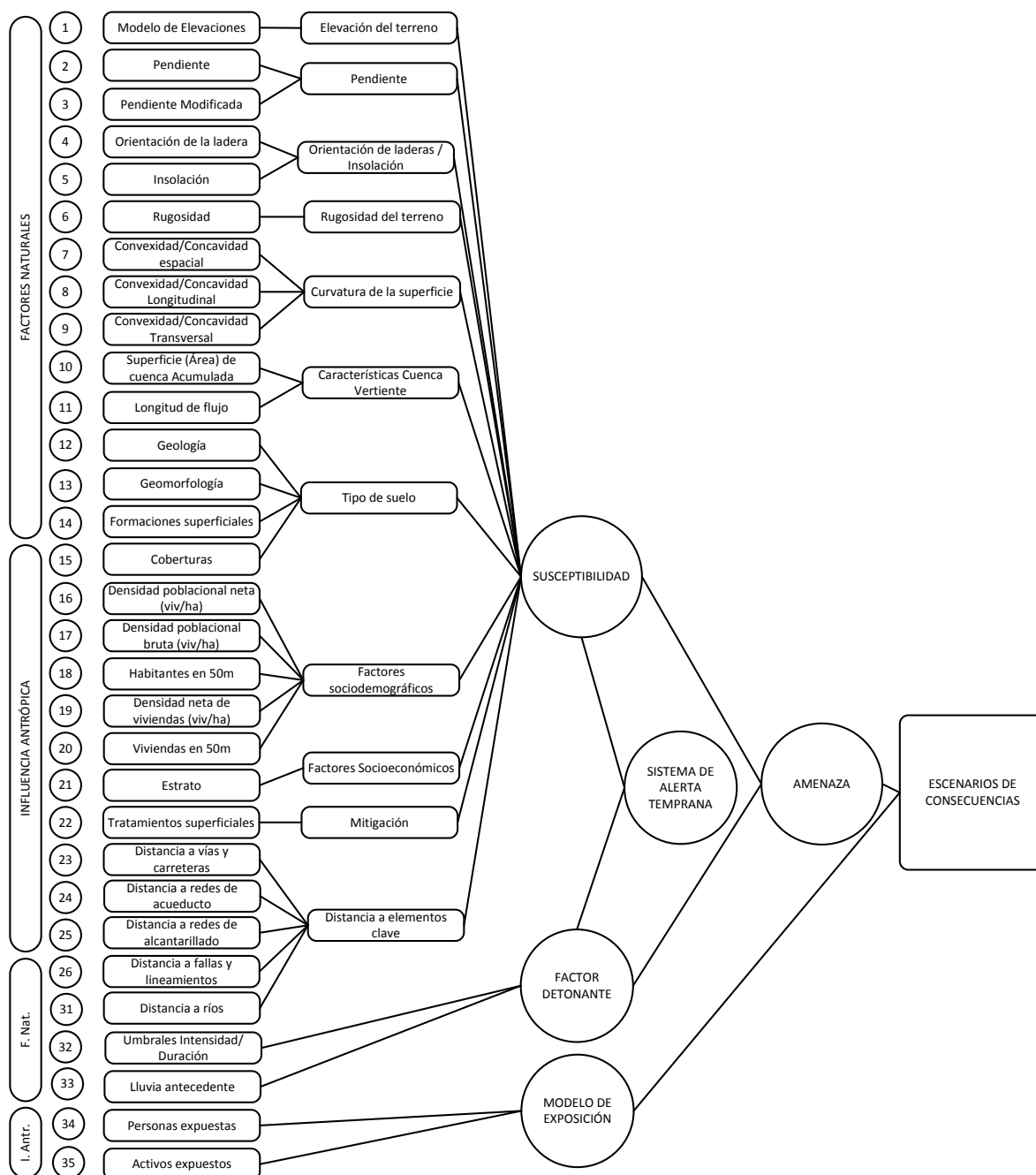


Figura 14. Factores de propensividad y sus relaciones con el marco de trabajo

Una descripción detallada de estas variables, su significado y su forma de cálculo, se da a continuación.

2.4.1. Factores naturales

2.4.1.1. Elevación del terreno

Corresponde a los valores de elevación sobre el nivel del mar del área de estudio. Se calcula a partir de las curvas de nivel del terreno, disponibles con diferencias de cotas de 2 metros, a través del software ArcGis, inicialmente utilizando la opción de representación de la superficie del terreno

denominada TIN (Triangulated Irregular Network) para luego obtener una malla de puntos GRID con un tamaño de celda de 5mx5m, como se ilustra en la Figura 15.

Al modelo digital de elevaciones DEM así obtenido, se hace una corrección, llenando los posibles valores incorrectos derivados del cálculo. Los valores incorrectos se refieren a hundimientos (Sink), los cuales son depresiones anormales producidas por deficiencias del cálculo, que generan para una celda cotas con valor significativamente más bajo que las celdas circundantes, y producen interrupciones en el flujo normal de agua que debería presentarse en el terreno real. Es decir, del cálculo del modelo digital de elevaciones surgen algunos puntos anormales que actúan como “sumideros”, por donde se infiltraría toda el agua proveniente, por ejemplo, de un drenaje superficial, sin justificación física. Para asegurar el mapeo correcto de los drenajes, estas depresiones deben llenarse, garantizando que los drenajes superficiales efectivamente conduzcan las aguas desde las partes elevadas a los ríos y quebradas a los cuales tributan.

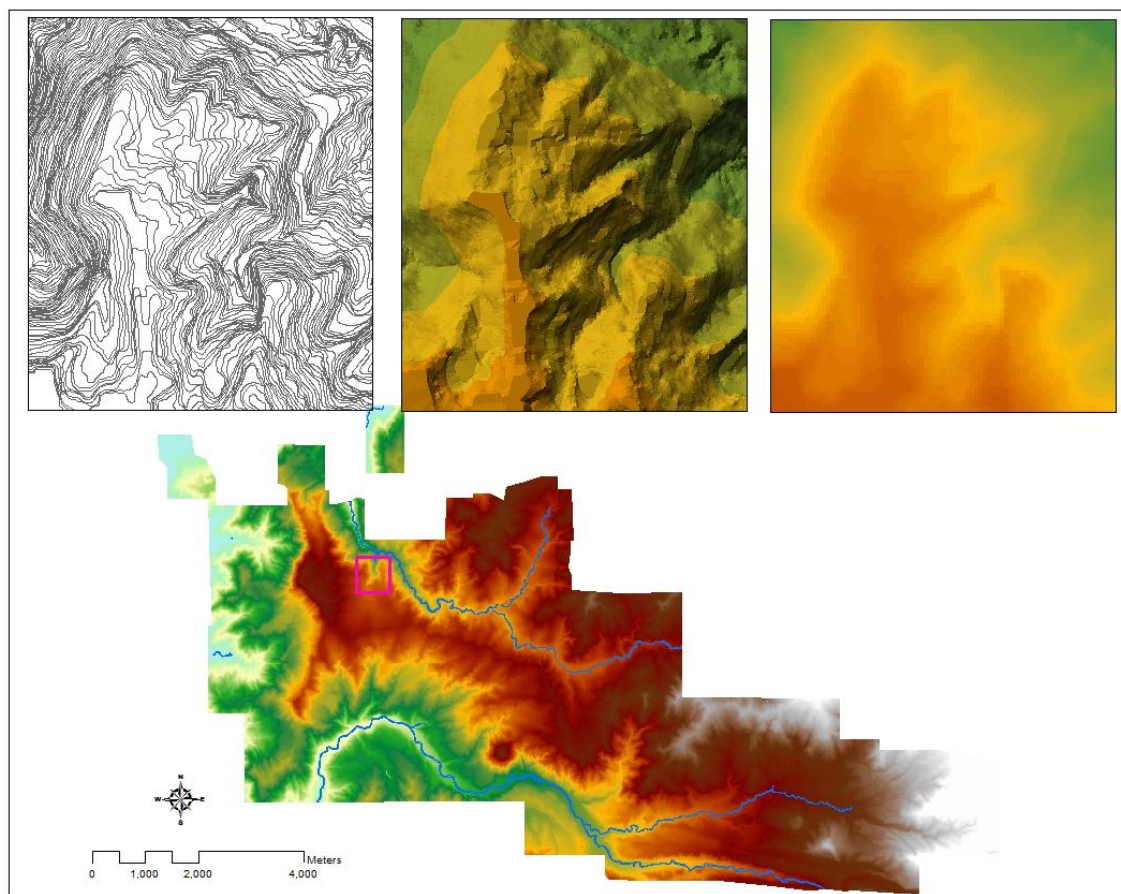


Figura 15. Conversión de datos de altitud en un modelo digital de terreno

2.4.1.2. Pendiente

2.4.1.2.1. Pendiente del terreno

Se trata de la pendiente en grados de la zona de estudio. Es el ángulo de la ladera respecto a la horizontal y varía desde 0° a 90°. La pendiente, tradicionalmente se ha relacionado con la aparición

de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. Esta variable se relaciona directamente con las tensiones de corte tangencial y normal en la formación superficial, e influye también en la dirección y cantidad del flujo superficial o superficial en el terreno (Dai and Lee 2002, 213-228)

2.4.1.2.2. Pendiente senoidal de las laderas

Es una transformación que se aplica a la variable PEND. Es la pendiente senoidal de la ladera definida como el seno del producto de la pendiente por el valor constante de 2 (Figura 16). Se trata de crear una nueva variable que se ajuste mejor al comportamiento de la pendiente respecto a las zonas de rotura de los deslizamientos superficiales. Cuanto mayor es la pendiente, mayor debería ser la susceptibilidad a la rotura de la formación superficial. Sin embargo, se observa que a partir de 45° ocurre lo contrario y la pendiente de la ladera es demasiado empinada para retener la formación superficial. Por este motivo, en las pendientes elevadas sólo aflora el substrato rocoso y la posibilidad de aparición de roturas se reduce drásticamente. Este comportamiento puede reproducirse mediante una función senoidal dando buenos resultados en análisis estadísticos de susceptibilidad a los deslizamientos (Baeza 1994, Santacana 2001). Añadir esta nueva variable, llamada PENDT, a la lista de variables a analizar puede ser útil en algunas zonas pero no en todas, debiendo valorarse su introducción. Por ejemplo, en los casos de intervención antrópica de las laderas (corte o lleno), resulta evidente que pueden generarse perfiles o laderas con pendientes elevadas en sustratos rocosos y formaciones superficiales indiscriminadamente, dejando sin peso la utilización de esta variable.

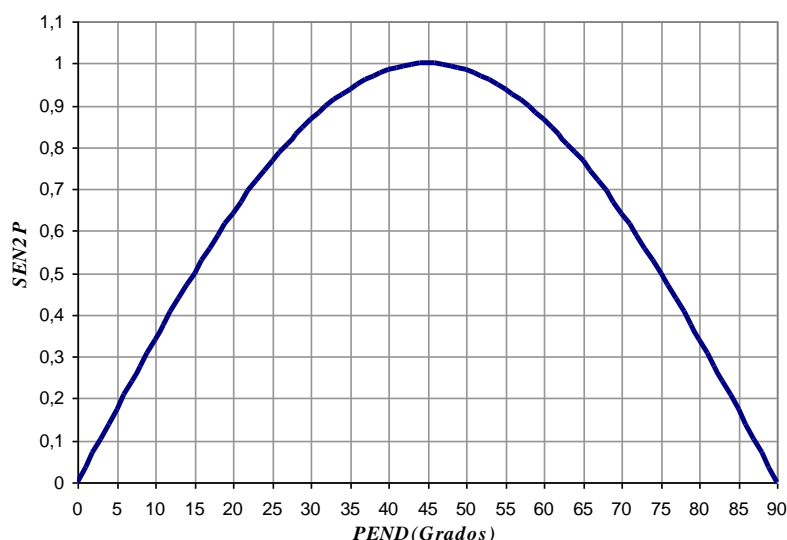


Figura 16. Transformación de la Variable Pendiente

Nótese que a partir de los 45° de pendiente el valor de la pendiente transformada (SEN2P) comienza a disminuir. La formulación general es la siguiente:

$$PendT = Sen(Pend * 2)$$

2.4.1.3. Orientación de las laderas / Insolación

2.4.1.3.1. Orientación de las laderas

Es la orientación que posee cada celda. Se calcula a partir de la dirección de la máxima pendiente obtenida para cada píxel respecto al norte geográfico, sus valores se encuentran dentro del rango 0° a 360° , es decir, se trata del azimut medido para la línea de mayor pendiente de cada celda. Esta variable refleja la situación de una ladera en cuanto a su insolación y por su relación con el fenómeno de evaporación superficial, es un indicador del estado seco o húmedo del terreno. Si la precipitación tiene un componente direccional por influencia de vientos, el monto de lluvia que cae en una ladera también puede variar dependiendo de su orientación (Wieczorek, Mandrone, and DeCola 1997).

2.4.1.3.2. Insolación del terreno

Insolación de la superficie se define como el coeficiente de iluminación o intensidad reflejada de la superficie terrestre. En el cálculo de este modelo se supone un movimiento del sol de oriente a occidente, es decir, la posición del sol a las 6:00 a.m. se supone con un azimut de 90° y una altitud con respecto al horizonte de 0° , llegando a las 12:00 m. a su valor de altitud máxima con 90° de inclinación respecto al horizonte. A las 6:00 p.m. la ubicación estará dada por un azimut de 270° y una altitud de 0° respecto al horizonte. Esta suposición resulta válida para zonas muy cercanas al ecuador, como en este caso, donde el sol incide de manera casi perpendicular y para un año promedio. En el caso de latitudes mayores o menores, sería necesario considerar además la declinación del sol como variable.

Para cada hora del día, según la posición del sol, se calculará un diagrama de sombras (HillShade) con la ayuda de ArcGis.

Para obtener el Modelo de Insolación del Terreno INSOL, se calcula el promedio de los modelos para cada hora del día (Tabla 3).

Tabla 3. Posición del sol para los cálculos de Insolación

Hora	Posición del sol	
	Azimut	Altitud
6:00 a.m.	90°	0°
7:00 a.m.	90°	15°
8:00 a.m.	90°	30°
9:00 a.m.	90°	45°
10:00 a.m.	90°	60°
11:00 a.m.	90°	75°
12:00 m.	$90^\circ/270^\circ$	90°
1:00 p.m.	270°	75°
2:00 p.m.	270°	60°
3:00 p.m.	270°	45°
4:00 p.m.	270°	30°
5:00 p.m.	270°	15°
6:00 p.m.	270°	0°

La variable sirve como indicador del tiempo en que las zonas se encuentran en la sombra (más húmedas) o al sol (más secas y expuestas a cambios bruscos de la cantidad de agua en el suelo debido a lluvias), elementos que reflejan de manera directa la cantidad de agua presente en el suelo, factor ligado inexorablemente a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Los valores oscilan de 0 (cero insolación) a 255 (máxima insolación); este rango proviene de la cantidad de colores disponibles en el Sistema de Información Geográfica para definir valores (256).

2.4.1.4. Rugosidad del Terreno

La rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área (en este caso de 3x3 celdas) y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. Es una variable cuantitativa y continua, con un rango de valores normalizados de 0 a 1. El valor 1 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen menores al aumentar la dispersión de los vectores (alta rugosidad). Normalmente los valores oscilan entre 0.7 y 1 (Santacana 2001)

La rugosidad define bien formas como los límites de taludes y laderas tanto en los valles como en las crestas. Se relaciona con los deslizamientos de manera que las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar deslizamientos debido a que los cambios sucesivos de pendiente favorecen una mayor infiltración del agua en el terreno y consecuentemente, su inestabilidad.

La variable RUGOS se calcula a partir del modelo de pendientes MDP (Pend) y el de orientaciones MDO (Aspect). Se utiliza la siguiente formulación general (Santacana 2001)

$$GRIDX = (SIN(MDO)) * (SIN(MDP))$$

$$GRIDY = (COS(MDO)) * (SIN(MDP))$$

$$GRIDZ = COS(MDP)$$

$$SUMX = SQR(FOCALSUM(GRIDX))$$

$$SUMY = SQR(FOCALSUM(GRIDY))$$

$$SUMZ = SQR(FOCALSUM(GRIDZ))$$

$$RUGOS = SQRT(SUMX + SUMY + SUMZ) DIV 9$$

2.4.1.5. Curvatura de la Superficie

2.4.1.5.1. Curvatura: Convexidad/concavidad espacial del terreno

Indica el grado de Convexidad/concavidad espacial de cada celda del terreno (en su centro), calculado a partir de un cuadrado de 3x3 celdas. Se determina mediante el radio de curvatura de la celda según un plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud. La variable se deriva del DEM, siendo cuantitativa continua, con un rango de valores cambiante según la zona, que oscila entre -20 y 20 de unidades

1/100 metros. El valor 0 en una celda corresponde a una superficie plana formada entre la celda en cuestión y sus ocho celdas vecinas, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. Para la elaboración de los mapas se ha considerado como muy cóncavo valores entre -20 y -10, cóncavo entre -10 y -2, plano entre -2 y 2, convexo entre 2 y 10, y muy convexo entre 10 y 20. La Figura 17 presenta la interpretación de estas mediciones en el terreno.

Esta variable se relaciona con los deslizamientos en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda, y se puede esperar un aumento en la presión de agua en los poros, igualmente, es de esperarse una mayor acumulación de formación superficial, mientras que en las celdas convexas ocurre lo contrario: el flujo se dispersa y el espesor de formación superficial debería ser menor. Algunos estudios sugieren que los deslizamientos superficiales ocurren principalmente en convergencias topográficas donde se concentra el flujo subterráneo, tales como depresiones canalizadas y hondonadas (Baeza 1994, Santacana 2001).

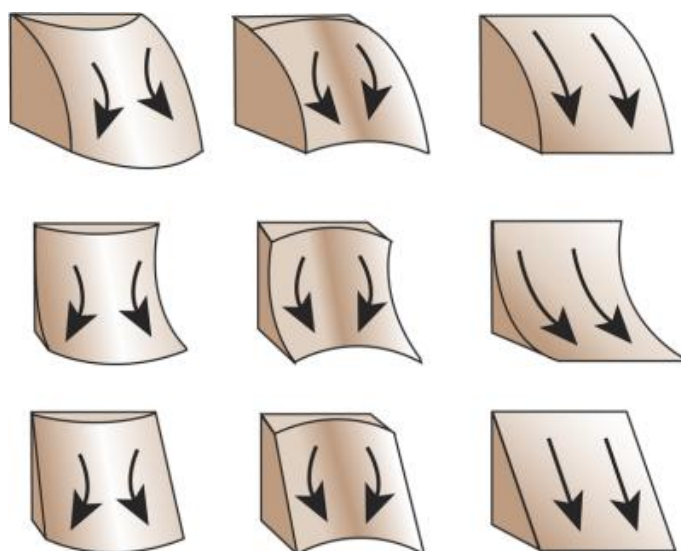


Figura 17. Curvatura de la superficie (Fuente ESRI)

2.4.1.5.2. Convexidad/concavidad longitudinal

Determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Su naturaleza es similar a la variable anterior, pero, a diferencia de esta variable que es tridimensional, PERFL se considera sólo en dos dimensiones: la vertical y la dirección de la pendiente; el valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. De manera similar a la variable anterior, indica la efectividad de la topografía para concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la

infiltración, la escorrentía y a la aceleración y desaceleración del flujo, y por lo tanto influye en la erosión y deposición de material en la superficie del terreno.

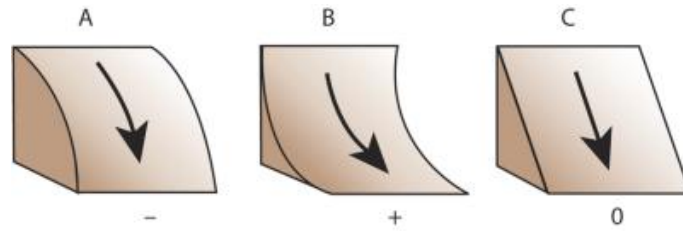


Figura 18. Curvatura longitudinal del terreno

2.4.1.5.3. Convexidad/concavidad Transversal

De manera similar a la variable anterior, representa el grado de convexidad o concavidad, en este caso transversal de la superficie del terreno (en la dirección perpendicular a la pendiente). Al igual que las dos variables previas, el valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. Tiene la misma función que las mencionadas variables, expresa la convergencia o divergencia del flujo hacia la celda.

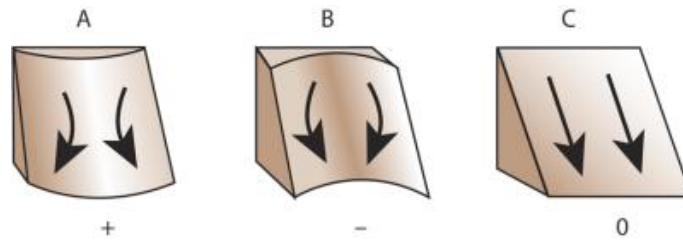


Figura 19. Curvatura transversal del terreno

Para las tres variables de curvatura, se tiene la siguiente justificación teórica (ESRI 1998)

Para cada celda se obtiene un polinomio de cuarto orden:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

Al fijar una superficie de 3x3 celdas se calculan los coeficientes para esta superficie:

$$A = [(Z1 + Z3 + Z7 + Z9) / 4 - (Z2 + Z4 + Z6 + Z8) / 2 + Z5] / L^4$$

$$B = [(Z1 + Z3 - Z7 - Z9) / 4 - (Z2 - Z8) / 2] / L^3$$

$$C = [(-Z1 + Z3 - Z7 + Z9) / 4 + (Z4 - Z6)] / 2 / L^3$$

$$D = [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / L^2$$

$$E = [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / L^2$$

$$F = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4L^2$$

$$G = (-Z4 + Z6) / 2L$$

$$H = (Z2 - Z8) / 2L$$

$$I = Z5$$

La Curvatura es la segunda derivada de la superficie, es decir, es la pendiente de la pendiente;

$$\text{Curvatura} = -2 * (D + E) * 100$$

2.4.1.6. Características de la cuenca vertiente

2.4.1.6.1. Área de Cuenca Acumulada

Corresponde a la superficie de la cuenca hidrográfica aguas arriba de la celda. Es la sumatoria de la superficie de las celdas que vierten a una celda determinada (cuenca acumulada). Es una variable acumulativa, los valores de la superficie son múltiplos del área de una celda, en metros cuadrados. Esta variable se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en el terreno. A mayor superficie más agua infiltrada, más posibilidades de producir roturas. El área de la cuenca ha demostrado ser un parámetro que influye mucho en la aparición de inestabilidades en las laderas (Santacana 2001)

Es la sumatoria de la superficie de las celdas que vierten a una celda determinada (cuenca acumulada), y se calcula a través de ArcGis.

Un paso intermedio es el cálculo del mapa de direcciones de flujo, cuya salida es la dirección del flujo según la orientación de cada celda en sus ocho posibles direcciones; el software se vale de números desde 1 a 128 (

Figura 20, Izquierda) para representar las ocho orientaciones posibles (

Figura 20, Derecha).

32	64	128	NW	N	NE
16	X	1	W	X	E
8	4	2	SW	S	SE

Figura 20. Direcciones posibles de flujo en el programa ArcView (Izquierda) y sus direcciones geográficas equivalentes (Derecha)

2.4.1.6.2. Longitud de Cuenca Acumulada

Indica la longitud máxima de la cuenca acumulada aguas arriba de una celda. Se trata de la longitud medida sobre la superficie del terreno y no de su proyección horizontal. Por este motivo, la longitud de cada celda se pondera con la pendiente de la misma y sus unidades son metros. La longitud, a diferencia de la variable anterior, tiene relación directa con las distancias, y por lo tanto los tiempos que recorre el agua sobre la superficie y en su interior (agua subterránea). Esta variable también da la indicación del tamaño de la cuenca acumulada, la capacidad de la misma para concentrar agua subterránea y de la posible acumulación de sedimentos (formación superficial). Se ha observado una relación muy estrecha entre la frecuencia de deslizamientos causados por lluvias torrenciales y la distancia a las crestas. Las celdas próximas a una cresta muestran menos roturas que las alejadas. La Figura 21 ilustra el cálculo de este factor:

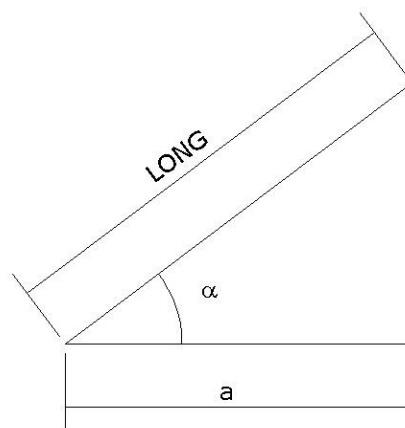


Figura 21. Cálculo de Variables LONG y PENDM

$$LONG = a / \cos(\alpha)$$

2.4.2. Tipo de suelo y Litología

2.4.2.1. Geología

Ha sido muy aceptado que la litología influye en la ocurrencia de deslizamientos. Las variaciones en litológicas y estructurales generalmente llevan a diferencias en resistencia y permeabilidad de rocas y suelos (Chauhan, S., et al., 2010). Los distintos tipos de estructuras o capas geológicas y sus límites y superposiciones pueden tener un papel importante en el tránsito del agua a nivel subsuperficial, lo cual puede afectar las condiciones de favorabilidad para la presencia de deslizamientos. Las diferencias en la mineralogía de los materiales en el subsuelo pueden constituir una precondition para la presencia de deslizamientos.

2.4.2.2. Geomorfología

Es comúnmente aceptado que la forma de la superficie del terreno es el resultado de un balance que altera el paisaje, conocido como ciclo geográfico. Por este motivo, los procesos geomorfológicos espacializados, constituyen una base sólida para el análisis de procesos de remoción en masa.

2.4.2.3. Formaciones Superficiales

Se define como formación superficial al conjunto de materiales que conforman la superficie de la tierra hasta profundidades del orden de decenas de metros, particularmente en el trópico húmedo. Estas incluirán por lo tanto suelos y rocas. (Hermelín 1985). Este parámetro se relaciona con la presencia de deslizamientos superficiales porque la resistencia de cada tipo de formación presente en un área determina la presencia o ausencia de deslizamientos.

2.4.2.4. Coberturas y Usos del Suelo

Refleja los tipos de cobertura y usos del suelo. La cobertura vegetal (tipo de cobertura) y su densidad influyen en la estabilidad del terreno mediante mecanismos que pueden clasificarse como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden la capacidad de infiltración en el suelo, la

humedad del suelo, la evapotranspiración, etc., mientras que los mecánicos traducen el aumento de resistencia que proporcionan las raíces y la protección frente a la erosión (Santacana 2001). La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen los mecanismos mencionados (Baeza 1994). Un ejemplo de ello es la presencia de raíces: aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo que favorecen una mayor infiltración del agua de lluvia.

El área urbanizada produce impermeabilidad en el terreno, beneficiando la estabilidad si se cuenta con una correcta canalización y disposición de aguas lluvias y negras, aunque también se aporta peso adicional a la ladera. Las áreas verdes o zonas deportivas, cultivos, al igual que los patios en tierra, actúan como esponjas, absorbiendo la precipitación e infiltrando agua a la ladera, situación desfavorable frente a la saturación del suelo, el cual es un factor desencadenante de deslizamientos.

2.4.3. Influencia antrópica

Se consideran en este componente todos aquellos factores de propensividad que pueden medirse en un contexto urbano. Se considera la variabilidad espacial de la exposición, y sus diferentes niveles según el grado de intervención, representado en disponibilidad de infraestructuras, e influencia de zonas construidas.

2.4.3.1. Factores socio-demográficos

Se ha clasificado en esta sección a los factores que reflejan de manera directa el número de personas expuestas a la amenaza. En cada barrio la topografía es variable, haciendo variable también el grado de exposición; como consecuencia, la densidad de viviendas, y por lo tanto el número de habitantes varía espacialmente de manera notable. La presencia o ausencia de personas en un área refleja también posibles grados de intervención antrópica en el terreno y disposición mayor o menor de aguas (servidas) en la ladera.

Para evaluar el ítem Factores Demográficos, se deben considerar densidades y número de habitantes como se muestra a continuación:

2.4.3.1.1. Densidad poblacional neta

Es la relación entre el número de habitantes de cada barrio y el área efectivamente construida del mismo. Se expresa en habitantes por hectárea construida. Tiene importancia en la medida en que en las construcciones habitan o permanecen mayor cantidad de tiempo las personas. Se expresa en número de habitantes por hectárea.

2.4.3.1.2. Densidad poblacional bruta

Es la relación entre el número de habitantes de cada barrio y el área total del barrio, incluyendo áreas verdes y zonas no construidas del mismo. Resulta importante considerar además

de la densidad neta, este factor, porque se supone que los habitantes del barrio tienen influencia en toda el área de éste (incluso influyen en áreas externas al barrio, deteriorando o mejorando el entorno), y en la medida en que la densidad de habitantes sea mayor, es de suponer que la influencia igualmente será mayor.

2.4.3.1.3. *Habitantes en un radio de 50m*

Es la sumatoria del número de habitantes presentes en un radio de 10 celdas (50 metros) en torno al punto de medición como se muestra en la Figura 22; da una indicación de la presión ejercida sobre cada porción del terreno de 5m de lado. Refleja de manera directa la concentración o dispersión poblacional en el territorio.

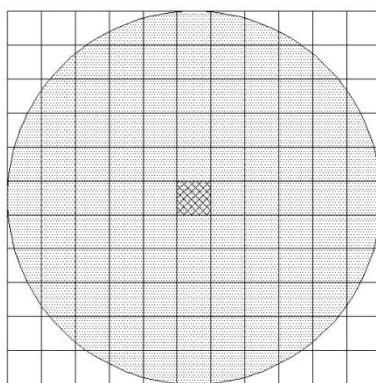


Figura 22. Área Utilizada en los cálculos de presión habitacional

El número de habitantes empleado en este cálculo por celda de 5m de lado surge de la relación del área de cada celda con la densidad neta de habitantes DNETHAB:

$$No.Habitantes = dNetHab \times \text{Área de Celda}$$

El cálculo del número de habitantes en 50 metros a la redonda utiliza el dato de habitantes por celda, haciendo lo que se conoce en ArcView como Estadísticas Focales, sumando el dato para las celdas que conforman un círculo de 50 metros de radio.

2.4.3.1.4. *Densidad neta de viviendas*

Es la relación entre el número de viviendas de cada barrio y el área efectivamente construida del mismo. Se expresa en número de viviendas por hectárea. Su cálculo es similar al factor DNetHab.

2.4.3.1.5. *Número de viviendas en un radio de 50m*

Es la sumatoria de las viviendas contenidas en un radio de 5 celdas en torno al punto de medición. Es un factor que pretende considerar la presión ejercida por las viviendas sobre cada porción del territorio (asimilable al peso de construcción sobre cada celda). Su cálculo es similar al del factor Hab50m.

2.4.3.2. Factores socio-económicos

2.4.3.2.1. Nivel socioeconómico de los habitantes

Este ítem refleja el poder adquisitivo de las personas, con ello la posibilidad que tienen de ubicarse en terrenos seguros y la capacidad de modificar sus viviendas y reducir la vulnerabilidad física de éstas. Igualmente, refleja la capacidad de ahorro para recuperarse, es decir, la tenencia de reservas para desplazamiento temporal o reconstrucción en caso de emergencias.

En Colombia, para establecer las tarifas de servicios públicos domiciliarios, se establece la “estratificación social”, (artículo 16 de la Ley 689 de 2001 y artículo 102 de la Ley 142 de 1994). Los inmuebles se clasifican en un máximo de seis estratos socioeconómicos así: 1) bajo bajo, 2) bajo, 3) medio-bajo, 4) medio, 5) medio-alto, y 6) alto.

Aunque lo ideal sería contar con un estimativo del ingreso mensual de las familias por vivienda, el estrato ofrece una idea general del mismo aspecto, pues clasifica espacialmente a la población según su nivel socioeconómico. Se trata de la única variable de este tipo que ha podido encontrarse en los datos disponibles al momento de elaborar este trabajo.

2.4.4. Mitigación

La mitigación se refiere a la modificación de laderas para su estabilización. Una ladera intervenida por una obra de estabilidad debería presentar mayor resistencia a los deslizamientos que una en la cual no se haya realizado ningún trabajo geotécnico. Obviamente, este criterio sólo es aplicable al considerar los usos del suelo y grados de intervención del terreno cercano a la obra de estabilidad.

2.4.4.1.1. Tratamientos Superficiales

Se localizan las laderas que según el municipio, fueron intervenidas y por lo tanto, presentan estabilidad. Este factor no influye directamente en el cálculo de la susceptibilidad; se considera posteriormente, como un factor que resta a la susceptibilidad obtenida por los modelos, en función del grado de mitigación que sea provisto por las obras de estabilidad.

2.4.5. Distancia a elementos clave

2.4.5.1. Distancia a vías

La construcción de un proyecto lineal (vía) introduce cambios drásticos al terreno donde se emplaza. Al hacer cortes o llenos en zonas montañosas se alteran los perfiles naturales del suelo, generando una franja alrededor de la vía con inestabilidad. Esta situación es acentuada si adicionalmente se consideran las características montañosas de la ciudad de Manizales, donde es común encontrar pequeños deslizamientos que, en épocas de invierno, ocasionan interrupciones de tráfico.

2.4.5.2. Distancia a red de acueducto y distancia a red de alcantarillado

En un razonamiento similar al anterior, la instalación de redes de acueducto y alcantarillado implica intervenciones directas de corte o relleno sobre el terreno, que pueden influir en su grado de estabilidad.

2.4.5.3. Distancia a fallas y lineamientos

Las fallas y lineamientos constituyen discontinuidades de la superficie que condicionan la resistencia del material circundante, al constituir planos donde han tenido lugar esfuerzos tectónicos o gravitatorios.

2.4.5.4. Distancia a cauces de ríos y quebradas

Se refiere a la distancia desde cada punto del terreno a los Cauces y Drenajes urbanos más cercanos. La distancia a los drenajes tiene relación con la frecuencia de deslizamientos. (Dai and Lee 2002) encontró que cuando la distancia a la línea de drenaje se incrementa, la frecuencia de deslizamientos decrecía. Debido a problemas de deforestación y malas prácticas de uso del suelo, en la zona de estudio es factible encontrar el fenómeno de erosión de cauces, lo cual produce desestabilización de los terrenos aledaños.

Con los factores anteriores se establece un set de variables, susceptible de modificaciones, adiciones, y actualizaciones, pues es elaborado con herramientas que permiten la fácil manipulación de datos, como es el caso de los SIG. Sin embargo, la fortaleza de este tipo de aplicaciones gráficas, no es simplemente la elaboración de mapas temáticos, sino su tratamiento numérico para posteriores análisis estadísticos y aplicación de técnicas matemáticas.

2.5. Muestra de análisis

Partiendo del inventario de eventos previos y aceptando que éstos reflejan la condición de máxima susceptibilidad, dado que son susceptibilidad materializada en deslizamientos, se tendrían nd puntos correspondientes a un valor máximo (1). Para evitar problemas de dependencia estadística se debe extraer igual número de ejemplares (puntos) correspondientes a valores mínimos de susceptibilidad (Santacana 2001). Si se asume que el inventario es exhaustivo, puede hacerse un muestreo aleatorio en la zona donde no existen eventos registrados para extraer tales datos de zona estable. Es importante considerar una “zona de influencia” alrededor de cada punto de deslizamiento, suponiendo que también es una zona afectable, y por lo tanto no puede tomarse como “estable”; para este efecto se ha utilizado un buffer de 20m en torno a cada punto del inventario de deslizamientos, justificado en el hecho de que los datos históricos de eventos presentan un área inferior. De esta forma se obtiene una muestra de análisis con $2xnd$ puntos en el terreno, entre estables e inestables

Con la ubicación de cada uno de los puntos constitutivos de la muestra es posible ir extractando el valor de cada uno de los factores de propensividad. De esta forma se configura una

matriz de datos con $2 \times nd$ filas correspondientes a igual número de puntos en la muestra de análisis y fp filas, correspondientes al número de factores de propensividad disponibles según el contexto del área de estudio, adicionando dos columnas extras para tener en cuenta las coordenadas X , Y de cada punto, y una más para clasificar la condición de cada punto como estable (0) o inestable (1).

La matriz de datos así configurada puede ser empleada para tratamiento de datos por diferentes técnicas disponibles. Se tienen, desde el punto de vista de modelización, una serie de factores y su respuesta asociada, y se desea encontrar la manera óptima de parametrizar los factores fp para llegar a dichos resultados conocidos. En otros términos, se quiere obtener el mejor arreglo de las variables de entrada que proporciona la salida más ajustada a los datos conocidos. Una vez se tenga una buena función de aproximación, es posible extrapolar los resultados al área de análisis completa, pues se tienen los parámetros para toda el área, y con ello es posible elaborar modelos representados espacialmente por mapas, en este caso de susceptibilidad a deslizamientos.

La evaluación de susceptibilidad a deslizamientos implica conocer las áreas potencialmente afectables sin tener aún una referencia temporal (frecuencia) ni la intensidad de los daños asociados (Aleotti and Chowdhury 1999), van Westen et al., 2006). Los modelos disponibles en la literatura para representar la susceptibilidad a deslizamientos pueden clasificarse en pocas categorías (Guzzetti, Carrara et al. 1999): Mapas de amenaza con base geomorfológica; Análisis de inventarios de deslizamientos; Métodos heurísticos o basados en índices; Métodos estadísticos; Métodos geotécnicos o basados en modelos físicos.

2.6. Métodos de agregación

La integración de las diferentes capas temáticas descritas en la parte 2 de esta sección, mediante la asignación de pesos según su importancia relativa en la generación de deslizamientos, en un entorno SIG, permite la creación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos. Existen diferentes formas de asignar pesos a los factores; desde la asignación empírica de valores según criterios de expertos (Saha, Gupta, and Arora 2002, Saha et al. 2005a, Saha et al. 2005b). Para evitar la subjetividad en la asignación de pesos, se han propuesto métodos cuantitativos, tales como análisis estadísticos, análisis determinísticos, modelos probabilísticos, análisis de frecuencias, entre otros.

La evaluación de susceptibilidad a deslizamientos implica conocer las áreas potencialmente afectables sin tener una referencia temporal ni la intensidad de los daños asociados (van Westen et al., 2006). Generalmente expresa correlaciones entre los factores causales y la distribución de eventos previos. Siguiendo este argumento, un inventario de deslizamientos es fundamental en cualquier proyecto de evaluación de susceptibilidad y determina la calidad de los resultados finales.

Para obtener la susceptibilidad a deslizamiento, considerando la disponibilidad de datos y las características del entorno, se han probado cuatro metodologías diferentes: 1. Análisis Discriminante; 2. Funciones de Favorabilidad o Relación de Frecuencias; 3. Conjuntos Difusos; y 4. Redes Neuronales Artificiales. El primer método utiliza la estadística clásica para generar una expresión que caracteriza la susceptibilidad a deslizamientos. El segundo es una técnica basada en análisis bivariado y relación de frecuencias relativas de áreas con y sin deslizamientos. El tercer método utiliza números difusos agregados mediante la función gamma de la teoría de conjuntos difusos. El cuarto método consiste en el entrenamiento de Redes Neuronales Artificiales para la clasificación de celdas estables/inestables. Una característica importante de los diferentes métodos es la posibilidad de aplicarse en ambientes con diferentes niveles de información. Se eligieron estas metodologías por ser robustas, flexibles y tener la particularidad de minimizar la subjetividad dada por el juicio de experto al asignar pesos en los modelos heurísticos.

Se eligieron estas metodologías por ser robustas, flexibles y tener la particularidad de minimizar la subjetividad dada por el juicio de experto al asignar pesos en los modelos heurísticos.

2.6.1. Función discriminante de susceptibilidad a deslizamientos

Una técnica disponible para obtener una función de susceptibilidad es el Análisis Discriminante de la estadística clásica; éste tipo de análisis se usa para modelar el valor de una variable categórica dependiente a partir de sus relaciones con uno o más predictores. En el caso de deslizamientos, la variable categórica sería la presencia/ausencia de deslizamientos.

Dado un set de variables independientes, el análisis discriminante tiene como objetivo encontrar combinaciones lineales de aquellas variables que mejor separen los grupos de casos. Esta combinación de variables es conocida como función discriminante y tiene la siguiente forma:

$$d_{ik} = b_{0k} + b_{1k}x_{j1} + \dots + b_{pk}x_{ip}$$

Donde

d_{ik} es el valor de la función discriminante para el caso i

P es el número de predictores

b_{jk} es el valor del j-ésimo coeficiente de la función

x_{ij} es el valor del caso i-ésimo para el predictor j

Algunos de los supuestos de este modelo son los siguientes:

Los predictores no están altamente correlacionados entre sí.

La media y varianza de un predictor dado no está correlacionada.

La correlación de dos predictores es constante entre grupos

Los valores de cada predictor siguen una distribución normal.

Con la información disponible se debe conformar una muestra de datos que tendrá una cantidad de elementos igual al doble del número de deslizamientos referenciados en el inventario. Se conformarán dos grupos sobre los que se hará el análisis: un grupo conformado por los puntos inestables (del inventario) y otro grupo constituido por igual número de puntos elegidos aleatoriamente en el área dónde no hay eventos registrados.

Un paso preliminar es hacer un análisis de correlaciones. Con el propósito de remover variables redundantes (altamente correlacionadas) de los datos, se calcula la matriz de correlaciones para tener una visión de la interrelación entre las variables de entrada.

Habrán algunos factores que presenten altas correlaciones; caso en el cual debe analizarse por pares qué variable es conveniente conservar y cual debe descartarse.

El test de igualdad de medias entre grupos mide el potencial de cada variable independiente antes de que el modelo sea creado. Cada test muestra el resultado de un análisis one-way ANOVA para la variable independiente usando la variable de agrupación como factor. Si el valor de significancia es mayor a 0.10, la variable probablemente no contribuye al modelo. Los valores Lambda de Wilks son otra medida del potencial de la variable. Valores pequeños indican que la variable es mejor discriminando entre grupos.

La correlación de los predictores o colinealidad se evalúa usando la matriz de covarianza entre grupos. Una inspección de la correlación de las covarianzas muestra las correlaciones altas entre los predictores y por tanto, evidencia aquellas variables que no cumplen el supuesto de independencia condicional. Ante esta situación, es conveniente hacer un razonamiento: Considérese por ejemplo una variable de “cobertura vegetal” y otra de elevación. La vegetación puede variar sistemáticamente según la elevación. Un supuesto de independencia condicional de estas dos capas no es razonable. En ese caso debe valorarse cómo son afectados los patrones de predicción si el supuesto de independencia condicional es violado (Chung: 2006).

El test Box's M es utilizado para probar la homogeneidad de las matrices de covarianza, chequea el supuesto de igualdad de covarianzas entre grupos. Los log determinantes son una medida de la variabilidad de los grupos. Valores altos corresponden a grupos más variables. Diferencias grandes en los valores indican que los grupos tienen diferentes matrices de covarianza.

Cuando el valor Box's M es significativo (Sig.=0), se debe chequear el modelo discriminante mediante matrices separadas para verificar si se obtienen valores de clasificación diferentes.

El Lambda de Wilks es una medida de la manera en que cada función separa los casos en grupos. Es igual a la proporción de varianza total en los coeficientes discriminantes no explicada por diferencias entre los grupos. Pequeños valores de lambda indican gran poder discriminante de

la función. El Chi-cuadrado asociado chequea la hipótesis de que las medias de las funciones son iguales entre grupos. Valores pequeños de Sig. Indican que la función discriminante tiene resultados mejores que el azar en la separación entre grupos.

La tabla de valores propios proporciona información sobre la eficacia de la función discriminante. Cuando existen dos grupos, la correlación canónica es la medida más útil en la tabla, y es equivalente a la correlación de Pearson entre los coeficientes discriminantes y los grupos.

Hay varias tablas que evalúan la contribución de cada variable al modelo, incluyendo los tests de igualdad de medias grupales, los coeficientes de la función discriminante y la matriz de estructura.

La matriz de estructura muestra la correlación de cada predictor con la función discriminante y constituye una prueba de la importancia que cada variable tiene dentro del modelo. El orden en esta matriz es igual al sugerido por el test de igualdad de medias grupales y es diferente del que aparece en la tabla de coeficientes estandarizados que constituye la ecuación del modelo lineal.

Los coeficientes estandarizados permiten comparar variables medidas en diferentes escalas. Coeficientes con valores absolutos altos corresponden a variables con alto poder discriminante.

El modelo lineal obtenido con la función discriminante se ensambla con los coeficientes canónicos y puede aplicarse a toda el área de estudio.

2.6.1.1. Análisis De Componentes Principales

Como complemento a este método estadístico, buscando entender mejor la estructura de los factores que llevan a la generación de deslizamientos, es posible ejecutar un Análisis de Componentes Principales, ACP, sobre los datos, que pretende contestar básicamente dos preguntas: ¿Cuántos componentes o factores son necesarios para representar las variables?, ¿Qué representan estos componentes?.

Brevemente, el ACP es un método para expresar datos multidimensionales como nuevas variables que no estén mutuamente correlacionadas, y son combinaciones lineales de las variables originales. Estas nuevas variables se conocen como Componentes Principales (CP).

Las principales razones para hacer un análisis de este tipo son las siguientes:

1. Reducir la dimensionalidad. Si algunas variables están correlacionadas, la dimensionalidad efectiva puede reducirse expresando la información como sus CP. Si unos pocos componentes expresan la mayor varianza de los datos originales, los demás componentes pueden ignorarse, reduciendo la dimensionalidad del problema.
2. Organizar variables en grupos con significado. Puede interpretarse o asignar significado al set de variables asociadas a los CP más importantes. Los PC pueden ser rotados para maximizar la diferencia de pesos entre variables. La rotación modifica los CP sin alterar su

estructura subyacente, permitiendo la fácil determinación de variables en cada CP y mejorando su interpretación.

3. Descartar variables redundantes. Algunas variables pueden ser redundantes y podrían ser descartadas. ACP permite identificar sistemáticamente variables con menor contribución a la varianza promedio de los datos.
4. Utilizar los CP para análisis subsecuentes. El ACP reduce la dimensionalidad de los datos. Por ejemplo, si los dos primeros CP reproducen la variabilidad de los datos, podrían ser dibujados en dos dimensiones y ser utilizados para análisis de clasificación tipo clúster.

Siguiendo el criterio conocido como regla de Káiser, se eligen los componentes con valores propios mayores a la unidad.

Las comunalidades indican el monto de varianza que es contemplado por los componentes para cada variable.

El test KMO es un estadístico que muestra la proporción de varianza que puede obedecer a los factores analizados. Mientras más se acerque a 1 el valor, el ACP resulta más útil; valores menores a 0.5 desaconsejarían la aplicación del método. El test de esfericidad de Bartlett contrasta la hipótesis de que la matriz de correlación sea una matriz identidad, lo cual indicaría que las variables no están relacionadas y el análisis sería inadecuado. Pequeños valores de niveles de significancia (<0.05) indican que el análisis puede ser útil.

La matriz de componentes principales ofrece una idea de la importancia de los diferentes factores dentro de cada componente principal obtenido.

2.6.2. Método De Funciones De Favorabilidad

Siguiendo a (Chung 2006), considérese un punto x con m valores de píxel (x_1, \dots, x_m) en un área de estudio A que consta de dos subáreas, una que contiene deslizamientos M y el área restante M^- . Sea $f\{x_1, \dots, x_m/M\}$ y $f\{x_1, \dots, x_m/M^-\}$ las distribuciones de frecuencia multivariada, asumiendo que un píxel es de M y de M^- , respectivamente. Entonces, la relación de frecuencias en x es definida como:

$$\lambda(x: x_1, \dots, x_m) = \frac{f\{x_1, \dots, x_m/M\}}{f\{x_1, \dots, x_m/M^-\}}$$

Cada factor causal disponible, según sus características, debe ser dividido en una serie de clases: en el caso de variables continuas se han utilizado 10 subdivisiones según la distribución por cuantiles de la información; para variables discretas se ha tomado el número total de clases disponibles.

En el caso de capas de datos temáticos, existen dos procedimientos para estimar la relación de probabilidades para datos categóricos, $\lambda(x: x_1, \dots, x_k)$ para un píxel x con k valores de píxel (x_1, \dots, x_k) cada x_i representando una categoría o clase, donde el píxel x está localizado en la i -ésima capa de datos. Un procedimiento posible requiere independencia condicional. Entonces,

$$\lambda(x: x_1, \dots, x_k) = \lambda(x: x_1) \dots \lambda(x: x_k)$$

En lugar de considerar todas las k capas al mismo tiempo, la relación de frecuencias puede estimarse como un múltiplo de k relaciones de frecuencias univariadas. Cada relación univariable se estima para una capa categórica individual en conjunto con la distribución de ocurrencia de deslizamientos:

$$\check{\lambda}(x: x_i) = \frac{\# \text{ píxels con deslizamientos en la categoría } x_i \text{ de la capa } i\text{-ésima}}{\# \text{ píxels sin deslizamientos en la categoría } x_i \text{ de la capa } i\text{-ésima}}$$

Utilizando la ecuación anterior bajo el supuesto de independencia condicional, la relación de frecuencias se expresaría como:

$$\check{\lambda}(x: x_1, \dots, x_k) = \check{\lambda}(x: x_1) \dots \check{\lambda}(x: x_k)$$

2.6.3. Método De Números Difusos

Como punto de partida para la aplicación de éste método se ha conservado la división en clases que se hizo a cada variable con el método anterior. De manera similar, en este caso se busca relacionar cada variable con la ocurrencia de deslizamientos, para estimar su importancia. Los factores más importantes pueden obtenerse mediante la estimación de la densidad de deslizamientos para cada grado de libertad o clase presente en cada variable. De esta manera pueden obtenerse funciones de frecuencia relativa.

Para cada grado de libertad de cada variable

$$D_i = \frac{Npix(SX_i)}{Npix(X_i)}$$

$$F = 100 \cdot D_i / \sum D_i$$

D_i es la densidad areal por clase y F es la frecuencia relativa escalada correspondiente a cada grado de libertad X_i

$Npix(SX_i)$ es el número de píxels con deslizamientos dentro del grado de libertad X_i

$Npix(X_i)$ es el número de píxels del grado de libertad X_i

Con el fin de preparar números difusos trapezoidales para los factores de inestabilidad, se ha seguido la solución propuesta por Goodman para inferir intervalos de posibilidad en el caso en que

las probabilidades son desconocidas. Las principales ecuaciones de la formulación de Goodman (Dubois 2004) son:

$$A = \chi^2(1 - \alpha/K, 1) + N$$

Donde $\chi^2(1 - \alpha/K, 1)$ denota el cuantil de orden $(1 - \alpha/K)$ de la distribución chi-cuadrado con un grado de libertad, y $N = \sum_{i=1}^K n_i$ denota el tamaño de la muestra.

$$B_i = \chi^2(1 - \alpha/K, 1) + 2n_i$$

$$C_i = \frac{n_i^2}{N}$$

$$\Delta_i = B_i^2 - 4AC_i$$

Entonces los límites de los intervalos de confianza se definen como:

$$[p_i^-, p_i^+] = \left[\frac{B_i - \Delta_i^{1/2}}{2A}, \frac{B_i + \Delta_i^{1/2}}{2A} \right]$$

Los valores de los vértices b y c de los números difusos trapezoidales se definen por el intervalo calculado con un nivel de confianza del 95% para las frecuencias relativas de cada grado de libertad de cada variable y corresponderá al intervalo más creíble $\alpha_{(x)} = 1$. Por esta razón se utilizará el punto medio del intervalo entre b y c como el valor más creíble para agregar los diferentes números difusos.

Como método de agregación de los números difusos se ha optado por utilizar el operador Gamma difuso

Operador Gamma

$$\mu_\gamma = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^\gamma * \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma}$$

2.6.4. Método de Redes Neuronales Artificiales

Esta técnica ha sido utilizada por varios autores con resultados satisfactorios. (Ermini, Catani et al. 2005) , (Melchiorre, Matteucci et al. 2008) en Italia; (Lee, Ryu et al. 2004) en Korea; (Neaupane and Achet 2004) en Nepal; (Nefeslioglu, Gokceoglu et al. 2008), (Yesilnacar and Topal 2005) en Turquía; (Pradhan and Lee 2010) en Malasia; (Gómez and Kavzoglu 2005) en Venezuela; (Kawabata and Bandibas 2009) en Japón, entre otras zonas donde se ha aplicado.

El modelo de Red Neuronal utilizado es conocido como Perceptrón Multicapa, con dos capas intermedias, una capa de entrada con 29 nodos, correspondientes a igual número de factores de

propensividad, y una capa de salida con un nodo, correspondiente a la función de susceptibilidad. Un esquema general de la topología del modelo se muestra en la Figura 23.

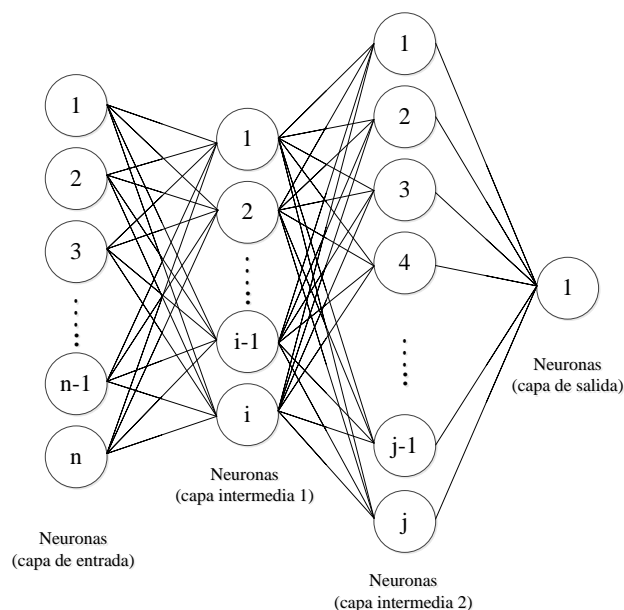


Figura 23. Esquema general de un modelo de RNA

El proceso de entrenamiento se lleva a cabo mediante el algoritmo backpropagation. Para la aplicación de este método, es necesario dividir la muestra de análisis en tres conjuntos de datos: Entrenamiento, Validación y Test. Una recomendación general disponible en la literatura es dividir la muestra de la siguiente manera:

Datos entrenamiento: 60% del total

Datos de validación: 20% del total

Datos de test: 20% del total

El resultado del proceso son n modelos diferentes, dependiendo del número de subdivisiones que permitan los datos, los cuales deberán ser agregados en un único modelo medio. Nótese que se obtiene una función de susceptibilidad acotada entre 0 y 1, que constituye la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, representada espacialmente y una desviación estándar para tener una idea de la calidad del resultado.

Un modelo de caja negra, basado en Redes Neuronales Artificiales (RNAs) ofrece un rendimiento satisfactorio para modelar problemas multivariantes no lineales. Para modelizar la susceptibilidad a deslizamientos con este enfoque, se ha utilizado como herramienta un perceptrón de dos capas intermedias, con el algoritmo backpropagation para el tratamiento del error. Este tipo de modelo ha sido usado para fines de predicción en el campo geotécnico con buenos resultados. La RNA puede entrenarse para identificar algunos valores (salida deseada) de un set de datos de entrada. El modelo ajusta los pesos de las conexiones entre nodos mediante el aprendizaje de cada

patrón de entrenamiento compuesto por las variables de entrada y salida correspondiente. Los factores de entrada corresponden a todos los factores causales descritos en la Sección 1 del presente capítulo, la presencia/ausencia de deslizamientos (inventario) corresponde a la capa de salida, y se tienen dos capas intermedias para calibrar los pesos.

El proceso de cálculo sigue el diagrama mostrado en la Figura 24. Los datos disponibles son divididos en tres grupos: entrenamiento, validación cruzada y test. Los datos de entrenamiento son utilizados para ajustar los pesos del modelo; los datos de validación cruzada se utilizan para detener el proceso de entrenamiento y evitar el efecto de memorización; y los datos de test se utilizan para medir el rendimiento en cuanto a capacidad de clasificación del modelo. La proporción de datos en los grupos es: 60% para entrenamiento, 20% para validación cruzada, y 20% para test.

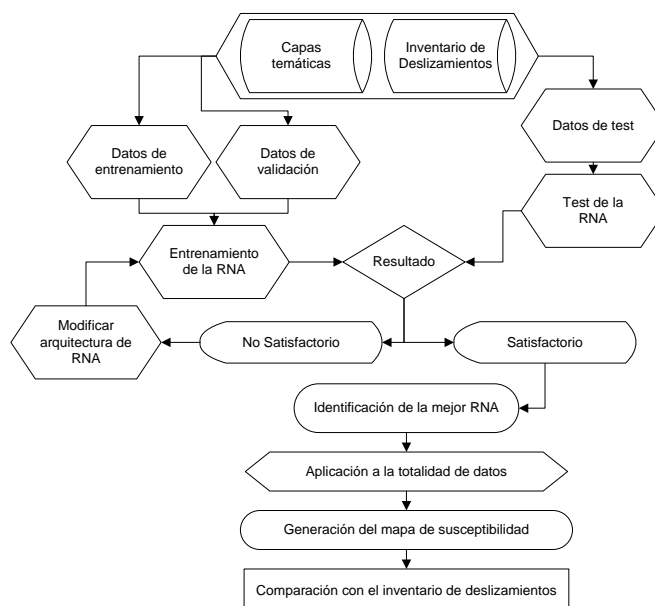


Figura 24. Proceso de modelización mediante RNAs

2.7. Pruebas de rendimiento y selección del modelo de mejor ajuste

Evaluar el rendimiento de los modelos de zonificación de susceptibilidad y amenaza frente a deslizamientos es una tarea difícil. Al tratarse de modelos que predicen eventos futuros, el mejor método de evaluación podría ser esperar y mirar (Corominas et al 2014), y probar así el rendimiento de los modelos a partir de los eventos posteriores a su elaboración. No obstante, esta solución no es práctica.

Probar el rendimiento de los modelos es una tarea compleja, incluye valorar la pertinencia (conceptual y matemática) del modelo y la descripción del problema; la robustez del modelo a pequeños cambios en los datos de entrada (sensibilidad), y la pertinencia del modelo prediciendo los datos observados (Davis and Goodrich 1990; Begueria 2006).

En el problema de zonificación de susceptibilidad y amenaza están involucrados varios tipos de incertidumbre. Comúnmente se consideran la incertidumbre aleatoria y la epistémica. La aleatoria es intrínseca al fenómeno. Una incertidumbre epistémica es causada por la falta de conocimiento en los datos, por ejemplo, la diferencia en interpretación en los datos por expertos.

Dentro del proceso de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos, una vez se tienen los modelos derivados de diferentes metodologías, pueden existir dos tipos de errores de clasificación que tienen influencia directa en los costos, en términos de planificación urbana:

Errores tipo I (falsos positivos), significan que una unidad sin deslizamientos es clasificada como inestable, y consecuentemente su uso y desarrollo económico puede haberse limitado. Una clasificación errónea de este tipo representa la pérdida de valor económico de la unidad de terreno. Este costo difiere para cada unidad del terreno pues es función de características ambientales y socioeconómicas

Errores tipo II (falsos negativos) significan que una unidad de terreno con deslizamientos es clasificada como estable, y consecuentemente puede utilizarse sin restricciones. Una clasificación errónea de este tipo significa la pérdida de elementos en riesgo que pueden ser impactados por deslizamientos en estas unidades.

Normalmente los costos relativos a los errores de tipo II son mucho mayores que los de tipo I. por ejemplo, ubicar un equipamiento en una zona clasificada incorrectamente como estable, puede generar altos costos de tipo económico y social si ocurre algún evento.

Para determinar la precisión de los diferentes modelos de susceptibilidad, pueden utilizarse diversos métodos de verificación. Uno muy utilizado es el análisis de la curva ROC (relative operating characteristics), consiste en un método para evaluar el ajuste de un test de diagnóstico, que puede utilizarse para distinguir entre dos clases de eventos y visualizar el rendimiento en

clasificación (Sweets, 1988; Gorsevski et al., 2006). En este método el área bajo la curva (AUC) contiene valores en el rango de 0.5 a 1.0 y es utilizada para evaluar el ajuste del modelo. La curva es un dibujo de la probabilidad de tener un verdadero positivo (un valor correctamente predicho) versus la probabilidad de un falso positivo (un valor incorrectamente predicho). Un modelo ideal muestra un valor AUC cercano a 1, mientras un valor cercano a 0,5 evidencia un inadecuado modelo.

En la Tabla 11 se muestran otros estadísticos de rendimiento de común utilización, aplicables para la validación de modelos de susceptibilidad a deslizamientos.

La tasa de verdaderos positivos (tp) y falsos positivos (fp) son insuficientes como estadísticos de rendimiento de los modelos, pues ignoran falsos positivos y falsos negativos. El Marcador de amenaza (Gilbert, 1884) mide la fracción de eventos observados y/o clasificados que fueron correctamente predichos.

Tabla 11. Estadísticos de rendimiento comúnmente utilizados (Corominas et. al. 2014)

Eficiencia (porcentaje correcto)	$\frac{t_p + t_n}{T}$
Relación de Verdaderos-positivos (sensibilidad)	$\frac{t_p}{t_p + f_n} = \frac{t_p}{P} = 1 - F_n$
Relación de Falsos-positivos (especificidad)	$\frac{f_p}{f_p + t_n} = \frac{f_p}{N} = 1 - T_n$
Gilbert Score (Threat score) curva crítica de éxito	$\frac{t_p}{t_p + f_n + f_p}$
Peirce skill score (true skill statistic)	$\frac{t_p}{t_p f_n} - \frac{f_p}{f_p + T_n}$
Heidke skill score (Cohen's kappa) (Heidke 1926)	$\frac{t_p + t_n - E}{T - E}$ $E = \frac{1}{T} [(t_p + f_n)(t_p + f_p) + (t_n + f_n)(t_n + f_p)]$
Odds ratio	$\frac{t_p t_n}{f_n f_p}$
Odds ratio skill score (Yule's Q)	$\frac{t_p t_n - f_p f_n}{t_p t_n + f_p f_n}$

tp = verdaderos positivos
tn = verdaderos negativos
fp = falsos positivos
fn = falsos negativos
P = predicción positiva (tp + fn)
N = predicción negativa (fp + tn)
T = número total de observaciones

Bajo estos criterios debe seleccionarse entre los diferentes modelos elaborados, el que mejor ajuste ofrezca y definirlo como el más adecuado para las siguientes fases de cálculo y para ser utilizado como insumo para el ordenamiento territorial del área de estudio.

2.8. Incorporación del factor detonante pluviométrico

Los deslizamientos detonados por lluvia ocurren súbitamente en muchos entornos montañosos. Algunos de estos deslizamientos ocurren súbitamente y viajan muchos metros a altas velocidades; éstos pueden constituir amenazas contra la vida y la propiedad, como lo demostró en desastre en el norte de Venezuela en diciembre de 1999. Otros deslizamientos responden de manera lenta a la lluvia, y se mueven de manera casi imperceptible (Iverson, 2000).

En la literatura existen estudios de identificación de intensidades y duraciones de lluvias que causan el fallo de laderas (Caine, 1980; Cannon and Ellen, 1985). Éstos métodos empíricos son importantes, pero no proveen un marco teórico para entender cómo los procesos hidrológicos influyen la localización, tiempos, y montos de deslizamientos, o para anticipar cómo la amenaza puede cambiar en función de cambios del clima o de usos del suelo (Iverson, 2000).

Los deslizamientos superficiales están asociados con lluvias intensas de corta duración (Alleotti, 2004; Coe et al., 2008), mientras los deslizamientos profundos se relacionan principalmente con lluvias acumuladas en largos períodos (Dahal et al., 2006).

La definición de umbral hace referencia a un nivel de una cantidad necesaria de cierta variable para que un proceso tenga lugar (Reinchenbach et al, 1998); en el caso de umbrales detonantes tiene relación con el nivel mínimo de cualquier variable relacionada con el proceso de precipitación, que al ser superado, pueda generar un proceso de remoción en masa (Alleotti, 2004)

En general, pueden citarse los siguientes tipos de umbrales disponibles en la literatura

Empíricos: basados en aproximaciones producto de la observación y experiencia. Se trata de relaciones entre el proceso y las condiciones ambientales. No se realizan análisis rigurosos, y las curvas umbral se determinan de manera visual, al dibujar el límite inferior de un conjunto de observaciones de condiciones que desencadenaron procesos de remoción en masa

Regresivos, en los cuales se halla un operador matemático de tipo inverso, relacionando dos variables; una como predictor de la otra.

Estocásticos, son un modelo de tipo especial de relaciones causa-efecto en los que la causa, al actuar sobre el sistema pueden generar diferentes estados asociados a un nivel de probabilidad. Un análisis probabilista de este tipo fue desarrollado por Brunetti et al (2010), para Abruzzo en Italia, donde se obtiene una relación duración/intensidad con probabilidades de excedencia.

Físicos, en los cuales las leyes de la física se tienen como referencia. Un ejemplo de ello son los modelos de infiltración que procuran simular el proceso de incorporación del agua de precipitación al cuerpo de talud. La dificultad de aplicación de este tipo de modelos radica en que requieren información hidrológica, litológica, morfológica y geotécnica detallada, la cual es difícil de recopilar en áreas extensas.

Experimentales. Consiste en la representación del objeto a modelar por analogía o escalabilidad, permitiendo la observación del mismo. Un ejemplo puede ser el análisis de taludes reales (o a escala) a los cuales puede realizarse mediciones en tiempo real de sus propiedades geotécnicas.

Para deslizamientos inducidos por lluvia, un umbral puede definir la precipitación, humedad del suelo, o condiciones hidrológicas, que al ser alcanzadas o excedidas, hacen posible la detonación de deslizamientos (Crozier 1996; Reichenbach et al. 1998; Guzzetti et al. 2007). Estos umbrales pueden basarse en principios físicos, es el caso de umbrales conceptuales, o ser obtenidos empíricamente mediante análisis de datos históricos, en el caso de umbrales estadísticos.

La primera propuesta de carácter global de un umbral de Intensidad-Duración de lluvias para la ocurrencia de deslizamientos superficiales (shallow landslides) fue la de Caine (1980). La expresión que dedujo para la relación de Intensidad y Duración de las lluvias detonantes fue la siguiente, aplicable para duraciones de lluvias entre 10 minutos y 10 días:

$$I = 14.82 \times D^{-0.39} \quad (0.167 < D < 500)$$

Donde D es la duración de lluvia en horas e I es la intensidad en milímetros por hora.

Desde el artículo pionero de Caine, se ha recolectado mucha información sobre condiciones que han desencadenado procesos de remoción en masa en varias regiones del mundo, y se han propuesto diferentes umbrales ID a escalas local, regional y global. Entre otras referencias, pueden citarse a Crosta and Frattini 2003; Aleotti 2004; Guzzetti et al. 2007.

En su trabajo, Guzzetti (2008), actualiza la propuesta de Caine con información recolectada en varios lugares del mundo a través de búsquedas en la literatura para establecer un nuevo umbral global ID para la iniciación de deslizamientos superficiales, usando una robusta técnica estadística. El nuevo umbral se compara con algunos publicados (Caine 1980; Innes 1983; Crosta and Frattini 2003). Para tener en cuenta efectos climáticos, la intensidad de lluvia es normalizada por la precipitación media anual y la lluvia diaria normal (RDN) y se establecen umbrales separados para los datos de lluvia normalizada. Igualmente, citan en su revisión bibliográfica un listado de 124 umbrales de lluvias detonantes de deslizamiento, incluyendo 52 del tipo ID y 19 con valores normalizados de ID. Del total, 62 son de tipo regional y 53 locales, y muy pocos de ellos han sido utilizados en sistemas de alerta temprana realmente operacionales.

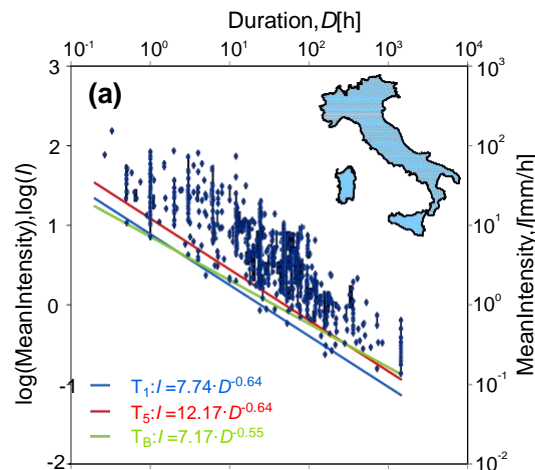


Figura 25. Umbrales de Intensidad Duración propuestos para Italia (Guzzetti, 2008)

En términos generales, en la literatura se encuentran dos tipos de propuesta para evaluar la dependencia de la ocurrencia de deslizamientos y la precipitación. El primer enfoque se basa en modelos físicos de procesos (Montgomery and Dietrich, 1994; Wu and Sidle, 1995; Iverson, 2000; Crosta and Frattini, 2003) y el segundo tipo utiliza la definición de umbrales empíricos (Caine, 1980; Reichenbach et al., 1998; Aleotti, 2004; Guzzetti et al., 2007, 2008). Los umbrales basados en modelos físicos se basan en las leyes físicas que controlan la estabilidad de laderas, e intentan extender espacialmente los modelos simplificados de estabilidad de tipo geotécnicos. Las condiciones de estabilidad son evaluadas por medio de modelos de estabilidad estática, asumiendo superficies potenciales de falla. Se asumen valores para la presión de poros, o se infieren de modelos de infiltración más o menos complejos.

Capítulo 3. APLICACIONES

3.1. Cuenca del río Chinchiná

3.1.1. Inventario de deslizamientos

A pesar de la frecuencia de ocurrencia y el impacto que generan los deslizamientos en la cuenca del río Chinchiná, no se dispone de un mecanismo sistemático de registro con miras a establecer un inventario detallado de eventos.

Se cuenta con un set total bruto de 893 puntos georreferenciados donde han ocurrido eventos de deslizamiento. La Figura 26 muestra los puntos disponibles.

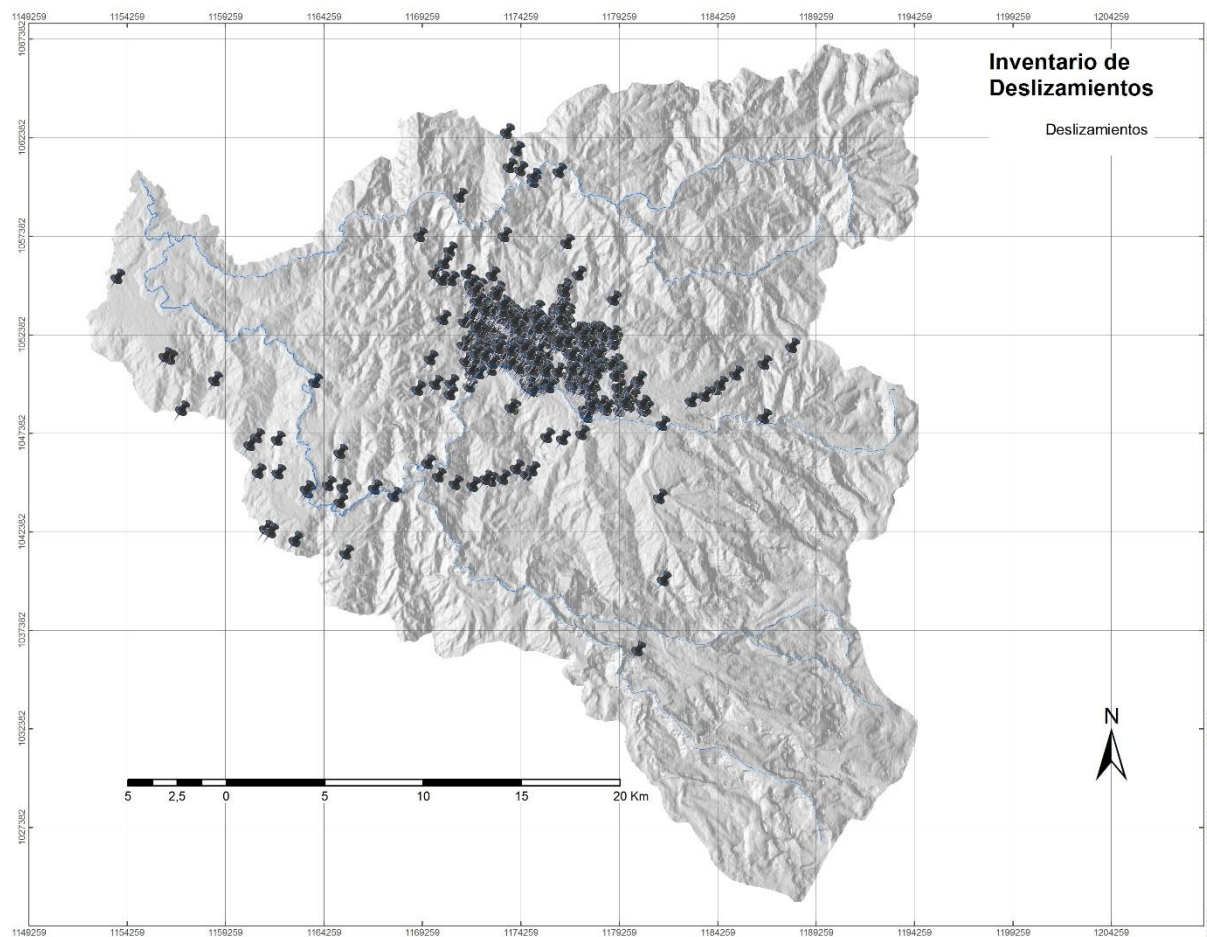


Figura 26. Inventario de deslizamientos previos en la cuenca del río Chinchiná

Teniendo en cuenta las características de la información disponible, es pertinente hacer algunas aclaraciones relacionadas con la distribución de eventos previos registrados por fuente. La mayor proporción de puntos del inventario provienen de la Alcaldía de Manizales y se concentran dentro del perímetro urbano de la ciudad o cerca de éste (756 puntos), lo cual puede explicarse por la recurrencia de eventos en los períodos de lluvias y el levantamiento sistemático de información

que adelantan entidades como la Oficina Municipal de Prevención y Atención de Desastres OMPAD desde hace algunos años.

En contraste, solo 137 eventos se distribuyen en los otros municipios y en el área rural de la cuenca. La base de datos SIMMA del Servicio Geológico Colombiano ha permitido extraer otros 34 puntos correctamente ubicados; Trans Gas de Occidente suministró 94 más, y mediante fotointerpretación de los vuelos C-2539, C-2575, R-1193 se han podido obtener 10 más.

En este punto resulta muy notoria la diferencia de disponibilidad de datos entre el área urbana y el área rural, lo cual puede obedecer a diferentes causas. La primera y más evidente es el levantamiento de información más sistemático que puede tenerse en el área urbana de una capital de departamento, al contar con más soporte técnico e institucional para adelantar esta tarea. La concentración de población y elementos expuestos en el área urbana también justifica que los eventos que ocurren sean debidamente notificados y llevados al inventario. En el área rural no se da esta circunstancia, y los registros disponibles están asociados a vías de cierta importancia, o infraestructuras, como en el caso de los datos de Trans Gas. Adicionalmente, existe la posibilidad de tener registros duplicados.

Surge aquí una inquietud desde el punto de vista teórico asociada a esta situación: ¿Efectivamente se presentan muchos más datos asociados al área urbana, en contraste con el área rural, o bien, se está dejando de registrar una gran cantidad de eventos dado su bajo impacto y su ocurrencia en áreas poco pobladas?. En caso de confirmarse la concentración de eventos en el área urbana, se estaría confirmando el carácter marcadamente socionatural del fenómeno de deslizamiento.

Desde el punto de vista numérico, extraer modelos a partir del inventario disponible, con concentración fuerte de datos en el área urbana, podría generar problemas de sesgo, los cuales llevarían a obtener modelos inapropiados. Adicionalmente, se busca un modelo aplicable a la zona rural de la cuenca; por ello se ha filtrado el conjunto de datos, descartando los registros que se encuentran dentro del perímetro urbano de la ciudad de Manizales y la población de Villamaría, para reducir la marcada influencia que se tiene hacia las áreas urbanas. El número total de puntos considerados, para la totalidad de la cuenca, considerando su situación rural, es de 234 eventos.

3.1.2. Factores de propensividad

A partir de la información disponible, se han seleccionado 17 factores potenciales de tres grande grupos: 1. Distancia a elementos clave; 2. Suelos/Geología; 3. Factores derivados de la topografía. Los factores así obtenidos se explican brevemente en la Tabla 12 y se presentan de la Figura 27 a la Figura 43.

Tabla 12. Factores causales de deslizamiento en la Cuenca del río Chinchiná

	Factor Causal	Tipo	Descripción
cobe	Mapa de cobertura	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de cobertura del terreno
mpar	Material parental (Geología)	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de material parental en la cuenca
geom	Procesos geomorfológicos	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de procesos geomorfológicos en la cuenca
dem	Modelo digital de elevaciones	Derivados de la topografía	Elevación del terreno en metros sobre el nivel del mar
slop	Pendiente	Derivados de la topografía	Pendiente de cada píxel de terreno en grados
se2p	Pendiente transformada	Derivados de la topografía	Se trata de una transformación senoidal de la pendiente $se2p = \sin(2 \times pend)$. El supuesto es que para taludes, se llega a un "ángulo límite" a partir del cual, si hay estabilidad, se considera que el material es suficientemente resistente y por lo tanto la propensión a deslizarse empieza a reducirse
aspe	Orientación de las laderas	Derivados de la topografía	Orientación de cada celda del terreno respecto al norte geográfico
curv	Curvatura de la superficie	Derivados de la topografía	Curvatura de la superficie. Un valor positivo indica que la superficie es convexa, mientras que uno negativo indica que es cóncava
prft	Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente	Derivados de la topografía	Curvatura (en un plano) perpendicular al sentido de la pendiente de cada píxel
prfl	Curvatura en el sentido de la pendiente	Derivados de la topografía	Es la curvatura del perfil longitudinal del terreno en cada píxel
acca	Área de cuenca vertiente	Derivados de la topografía	Para un píxel dado, es la sumatoria de todos los píxeles cuyas aguas drenan hacia él. (similar al concepto de área aferente)
lcca	Longitud de flujo	Derivados de la topografía	Para un píxel dado, es la distancia máxima que podría recorrer una gota de agua que drenara hacia él
inso	Insolación incidente en el terreno	Derivados de la topografía	Es el promedio de los mapas de insolación para cada hora del día; se calcula según la posición del sol y varía de 0 o nula insolación hasta 255 o máxima insolación
dfal	Distancia a fallas y lineamientos	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la falla geológica más cercana
dvía	Distancia a vías y carreteras	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la vía más cercana
dpob	Distancia a centros poblados	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el perímetro de la población o asentamiento más cercano
drio	Distancia a ríos y cauces	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el cauce, quebrada o río más cercano

3.1.2.1. Suelos / Geología

3.1.2.1.1. Mapa de cobertura

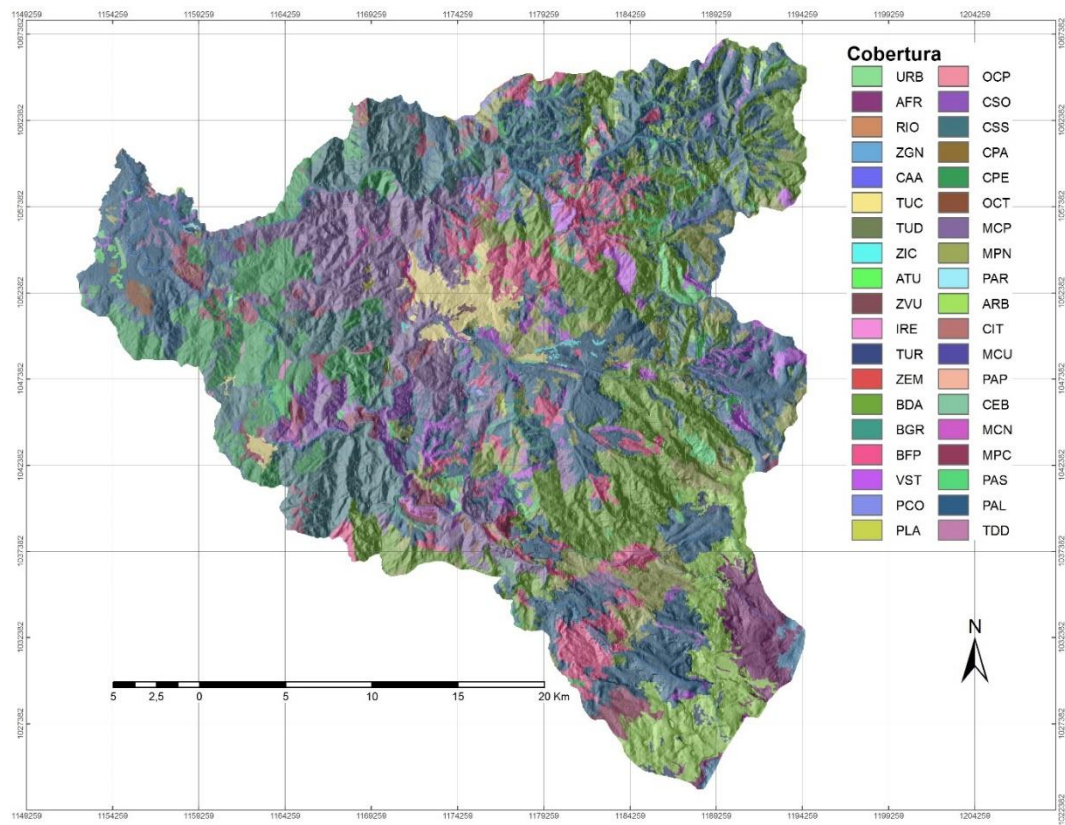


Figura 27. Mapa de coberturas (reclasificación a partir del mapa de coberturas suministrado)

3.1.2.1.2. Material parental (Geología)

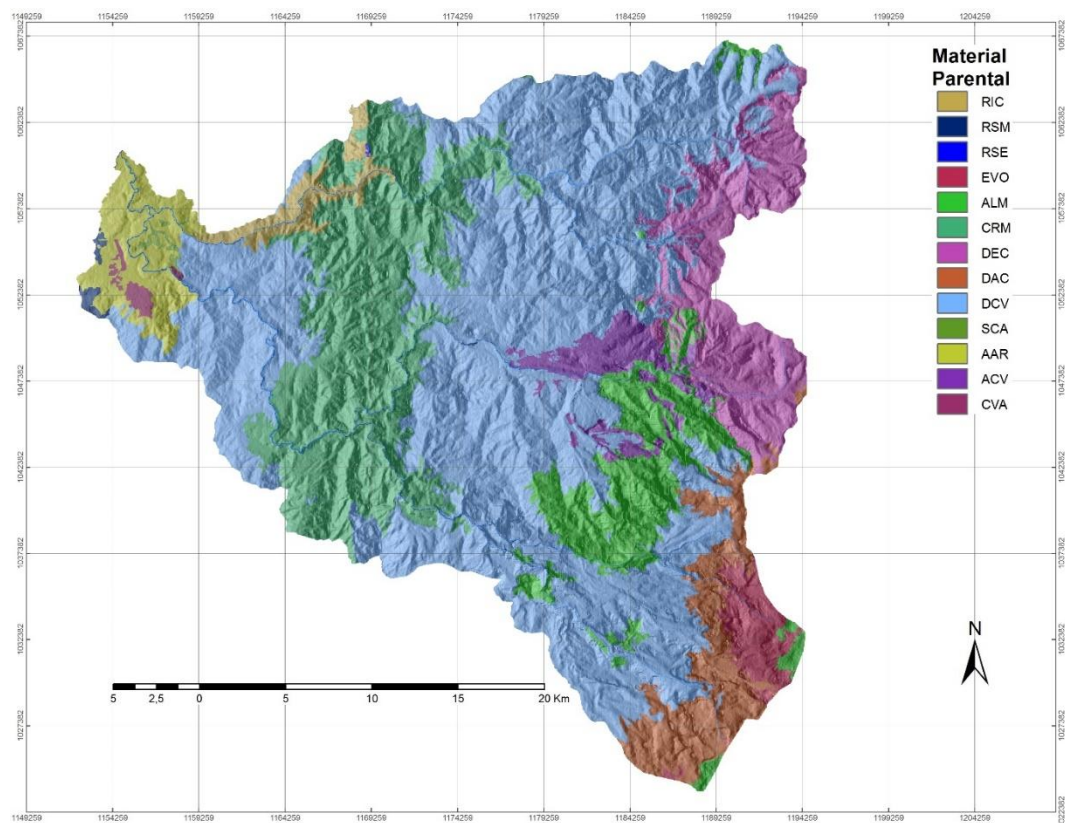


Figura 28. Mapa de características geológicas (material parental)

3.1.2.1.3. Procesos geomorfológicos

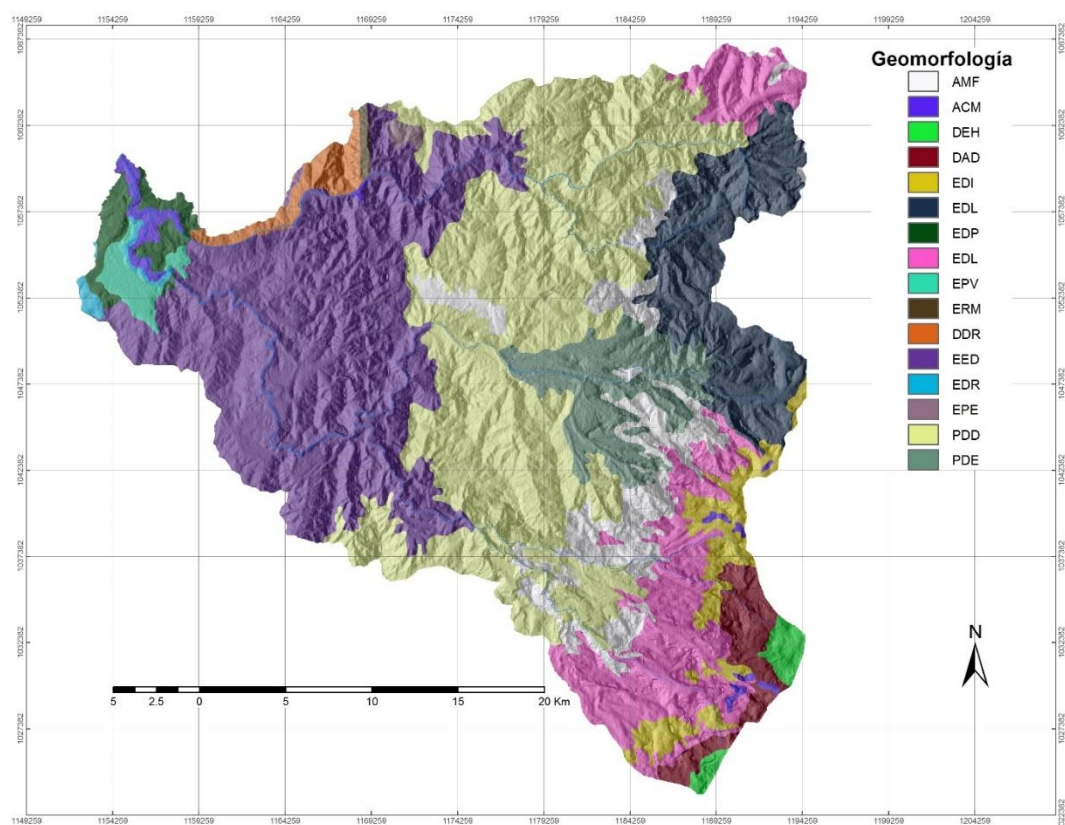


Figura 29. Mapa de procesos geomorfológicos

3.1.2.2. Derivados de la topografía

3.1.2.2.1. Modelo digital de elevaciones

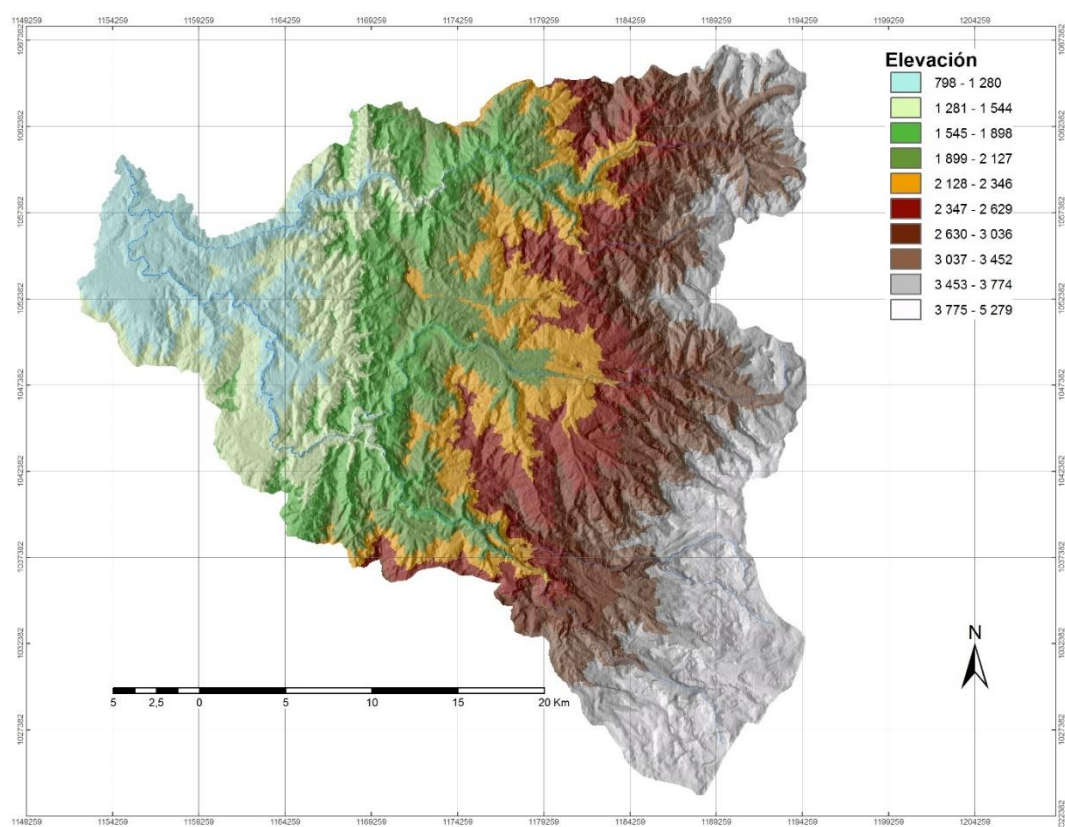


Figura 30. Modelo digital de elevaciones

3.1.2.2. Pendiente

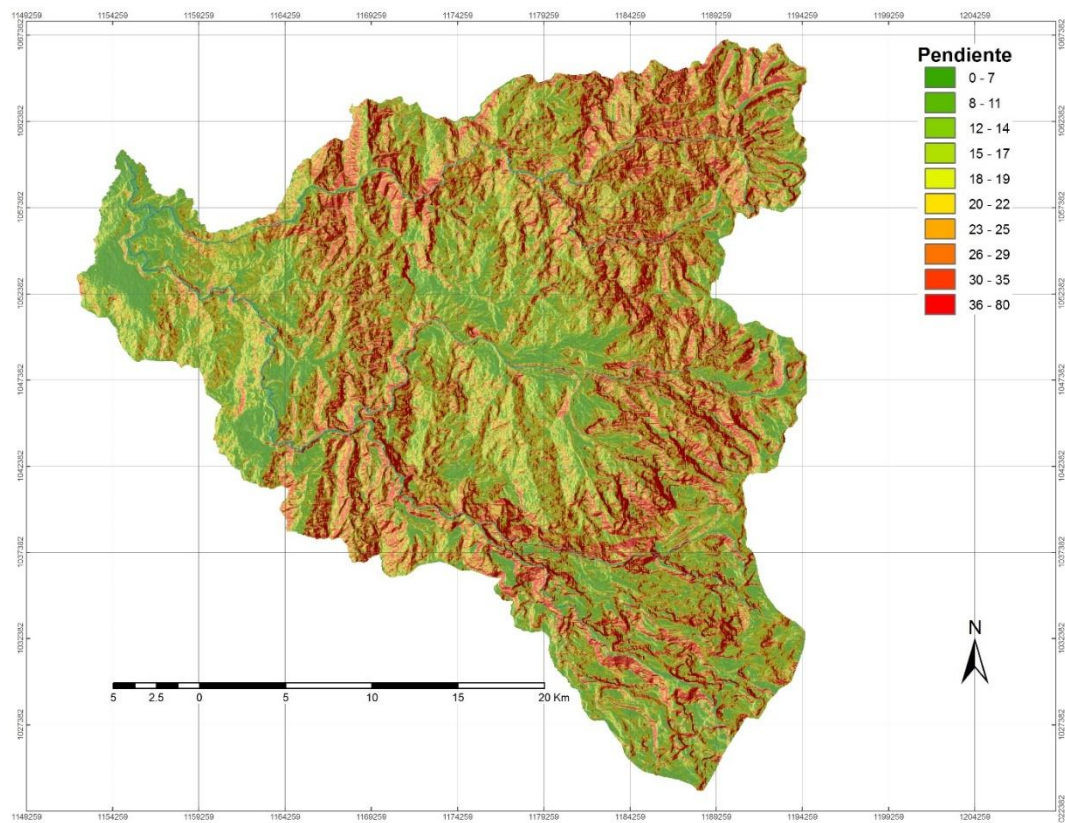


Figura 31. Pendiente del terreno

3.1.2.2.3. Pendiente transformada

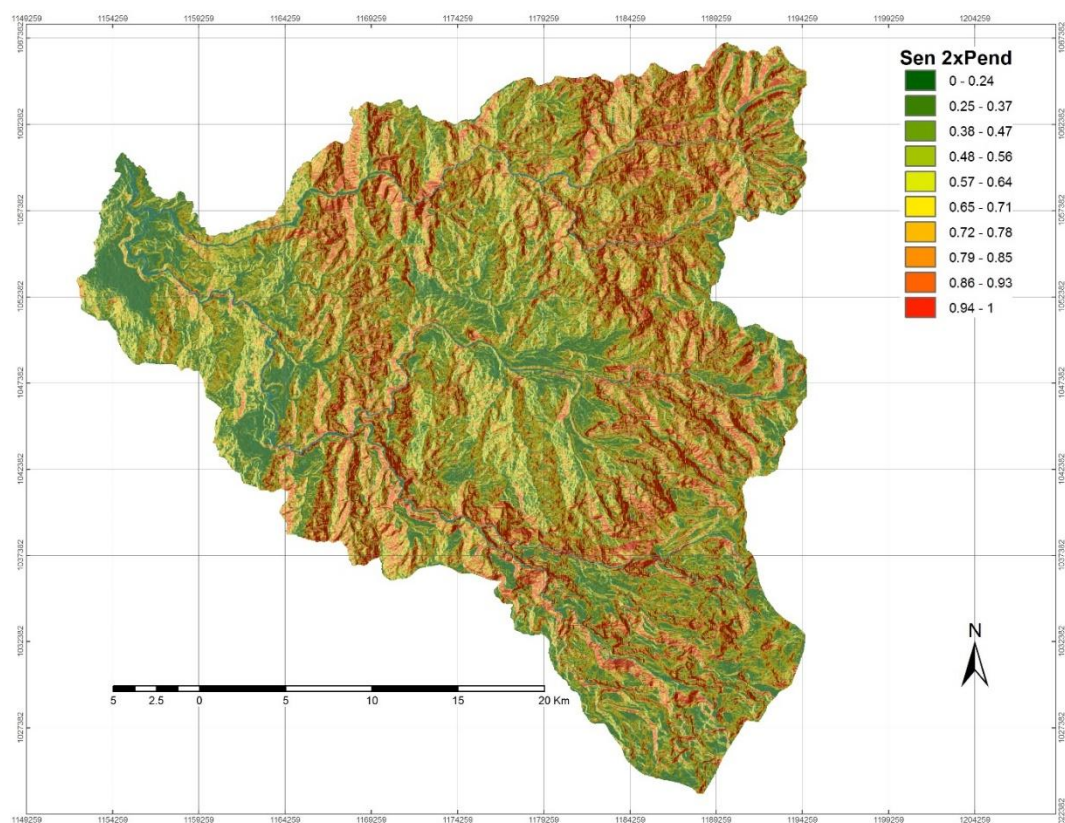


Figura 32. Pendiente transformada del terreno

3.1.2.2.4. Orientación de las laderas

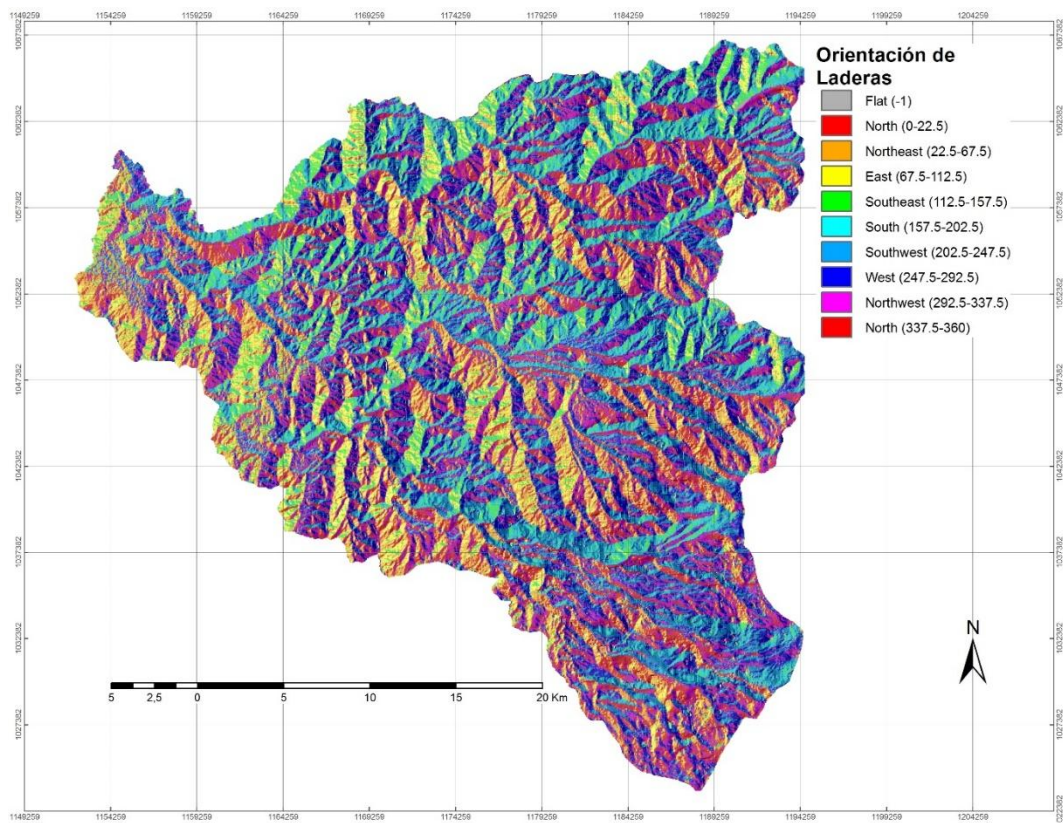


Figura 33. Orientación de las laderas

3.1.2.2.5. Curvatura de la superficie

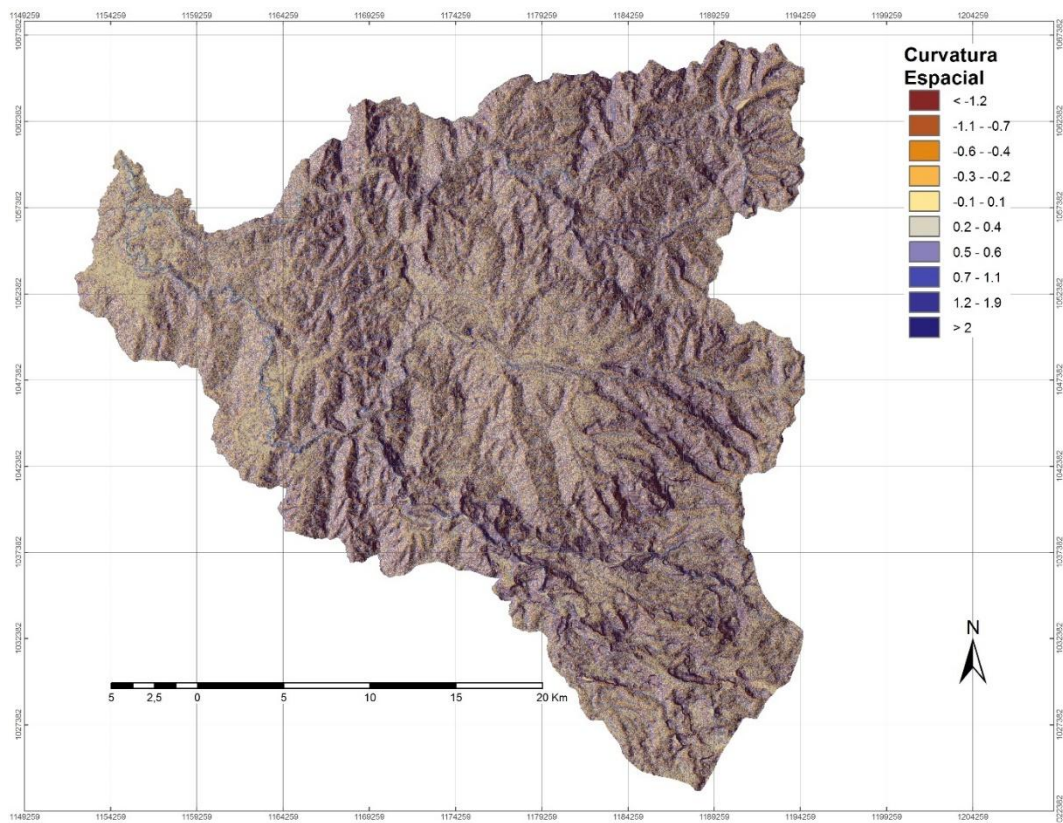


Figura 34. Curvatura del terreno

3.1.2.2.6. *Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente*

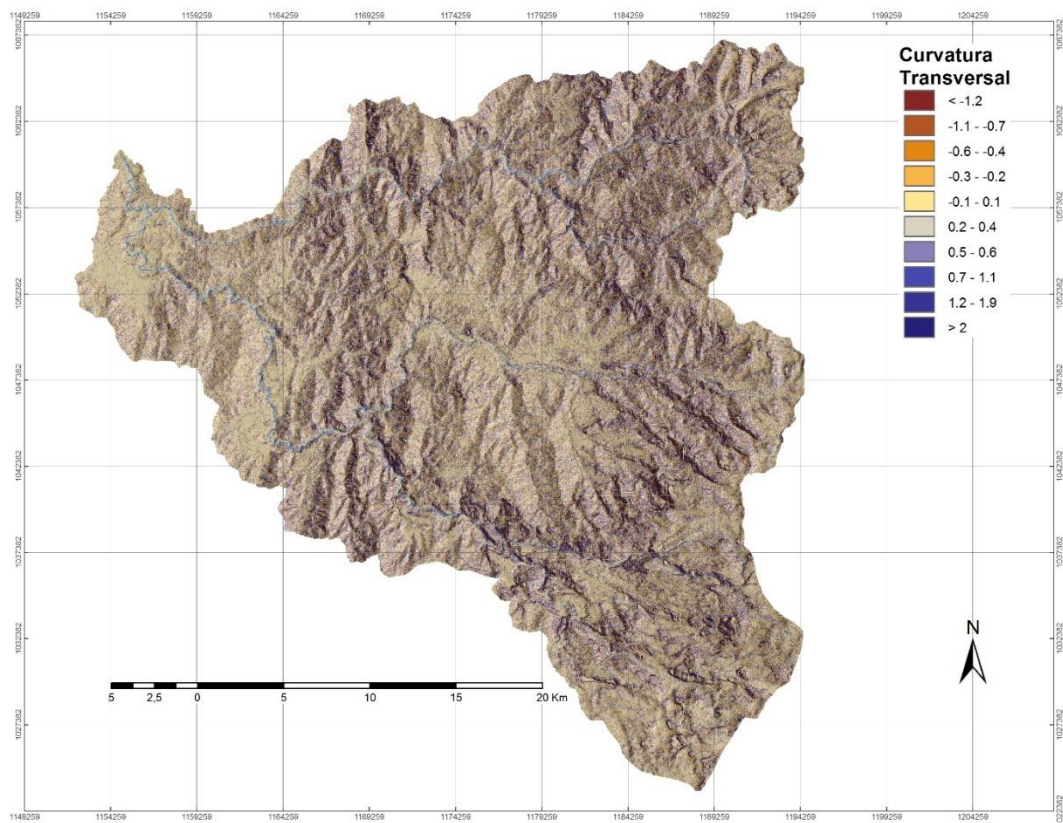


Figura 35. Curvatura transversal del terreno

3.1.2.2.7. *Curvatura en el sentido de la pendiente*

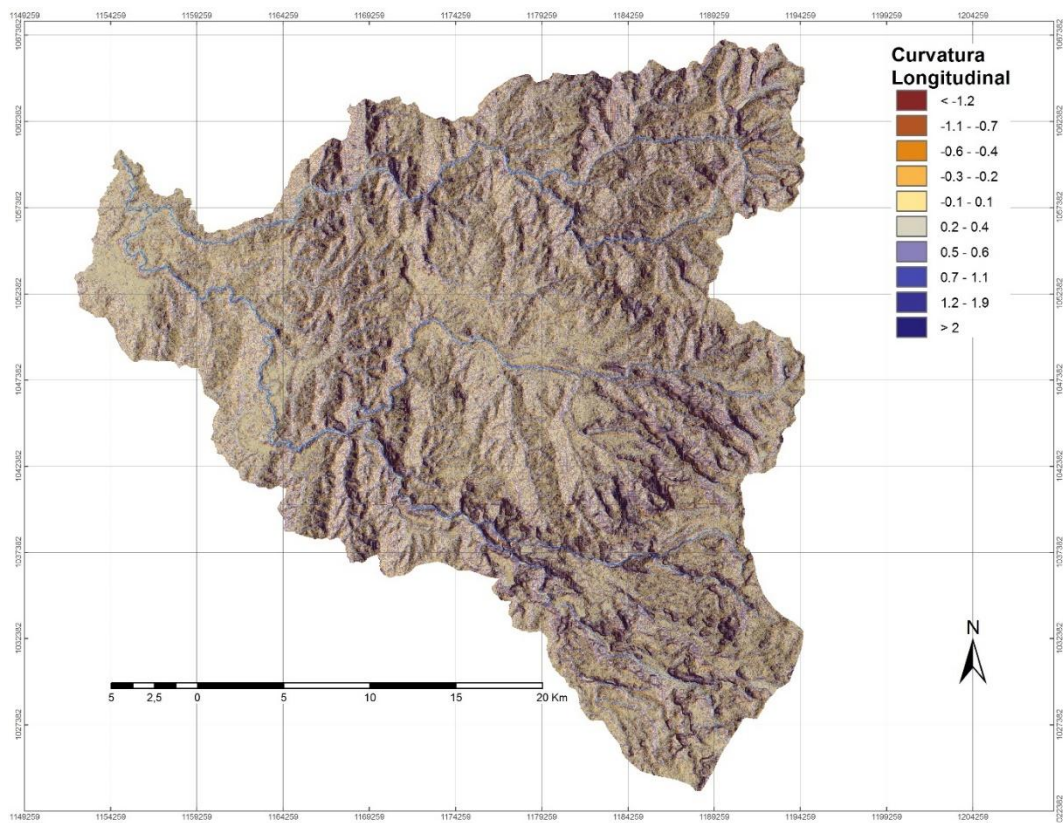


Figura 36. Curvatura longitudinal del terreno.

3.1.2.2.8. Área de cuenca vertiente

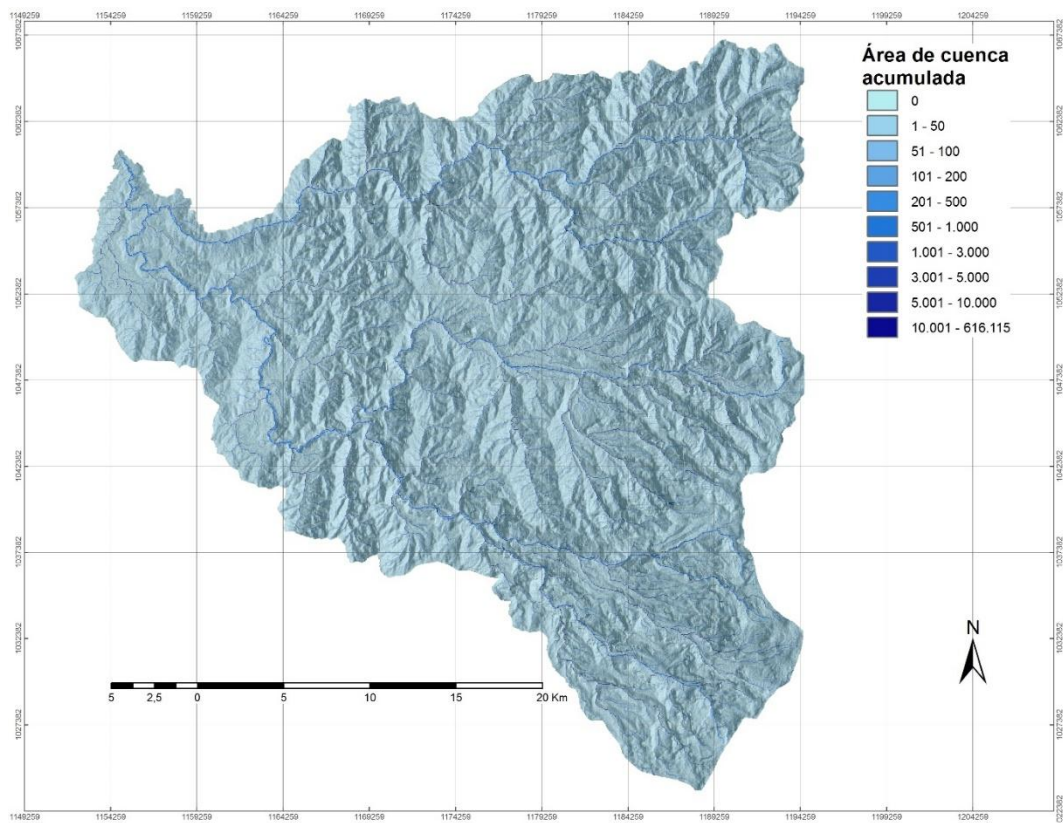


Figura 37. Área de cuenca vertiente

3.1.2.2.9. Longitud de flujo

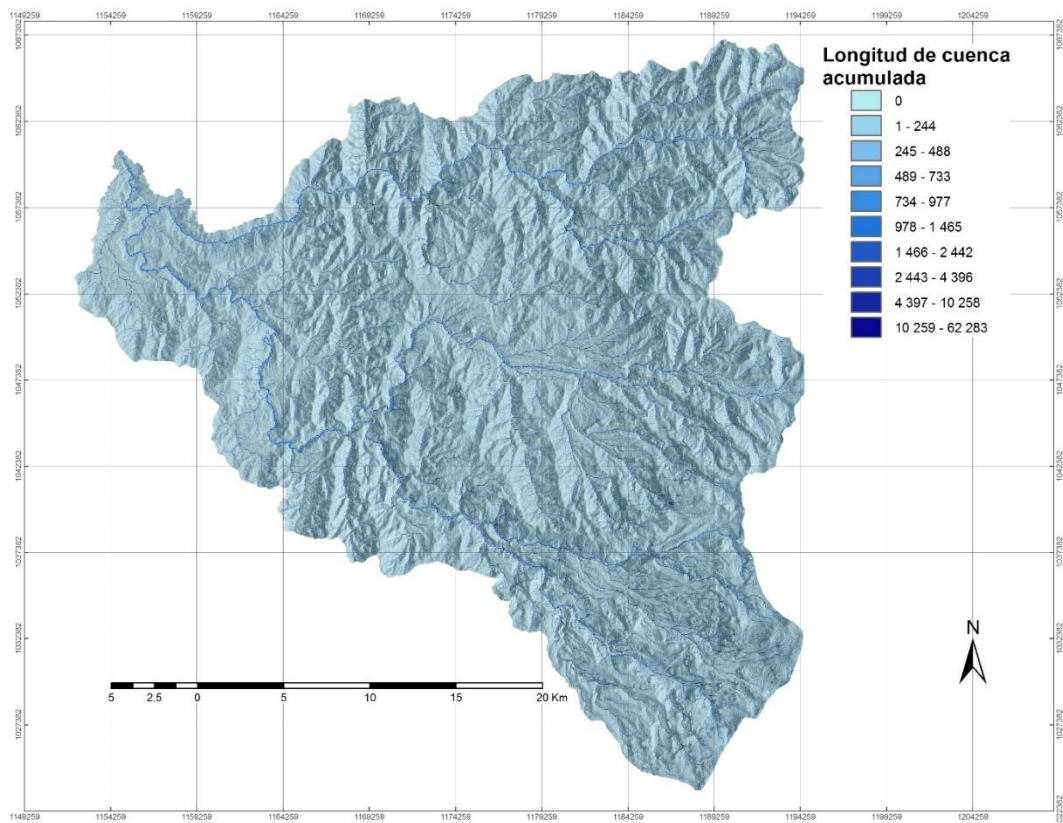


Figura 38. Longitud de cuenca vertiente

3.1.2.2.10. Insolación incidente en el terreno

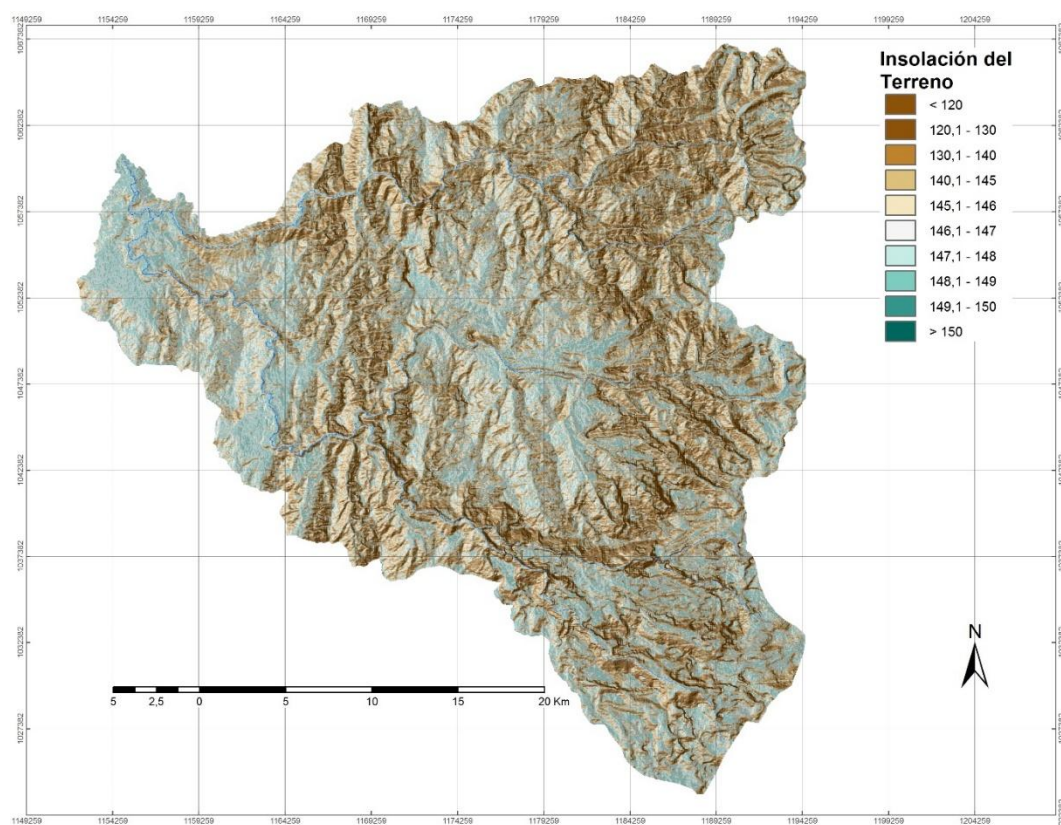


Figura 39. Insolación del terreno

3.1.2.3. Distancia a elementos clave

3.1.2.3.1. Distancia a fallas y lineamientos

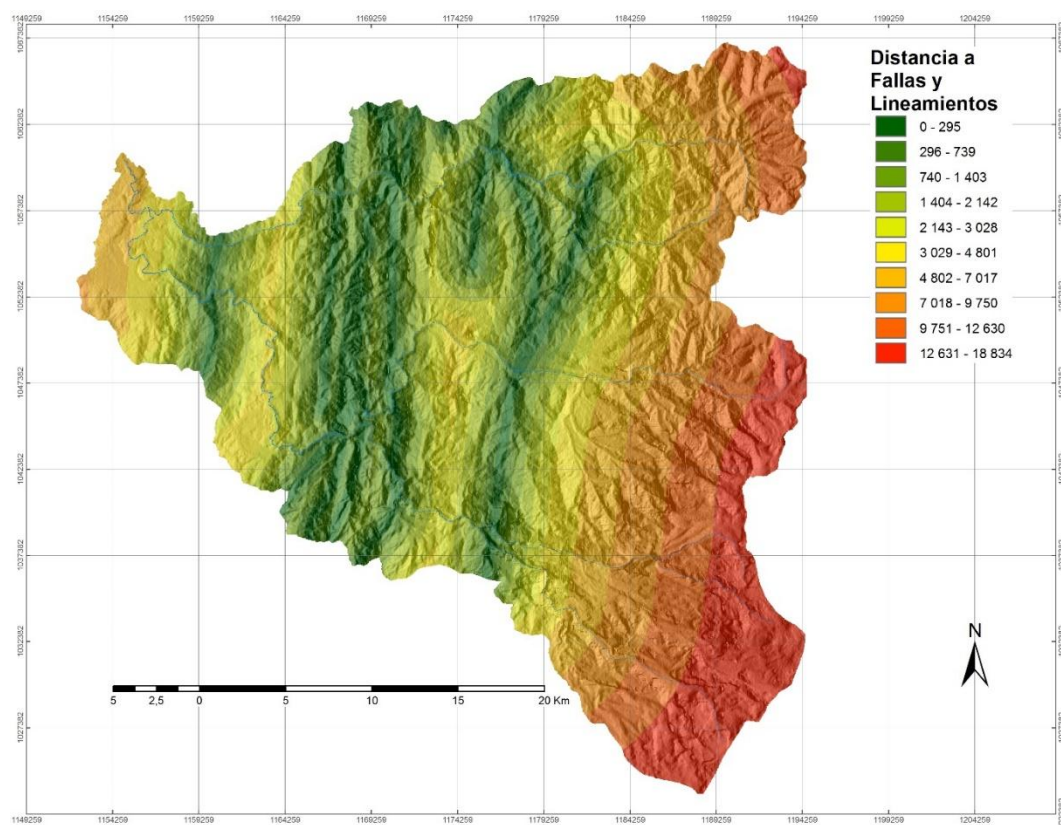


Figura 40. Distancia a fallas y lineamientos

3.1.2.3.2. Distancia a vías y carreteras

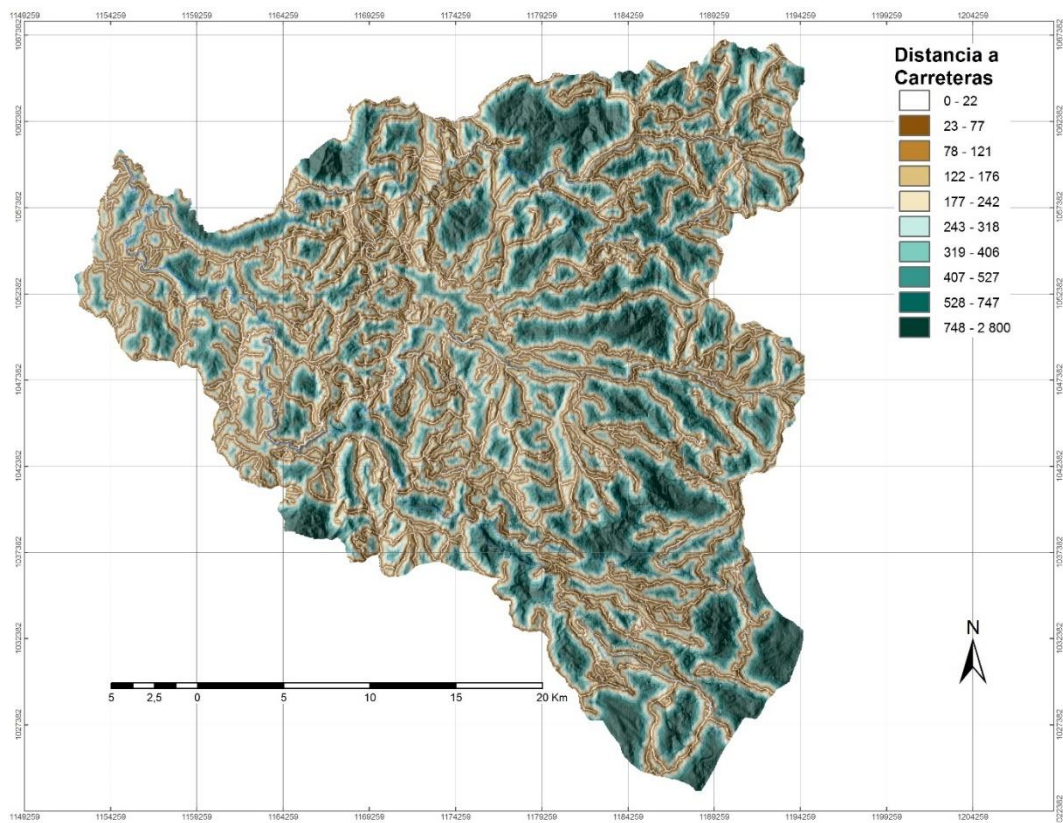


Figura 41. Distancia a vías

3.1.2.3.3. Distancia a centros poblados

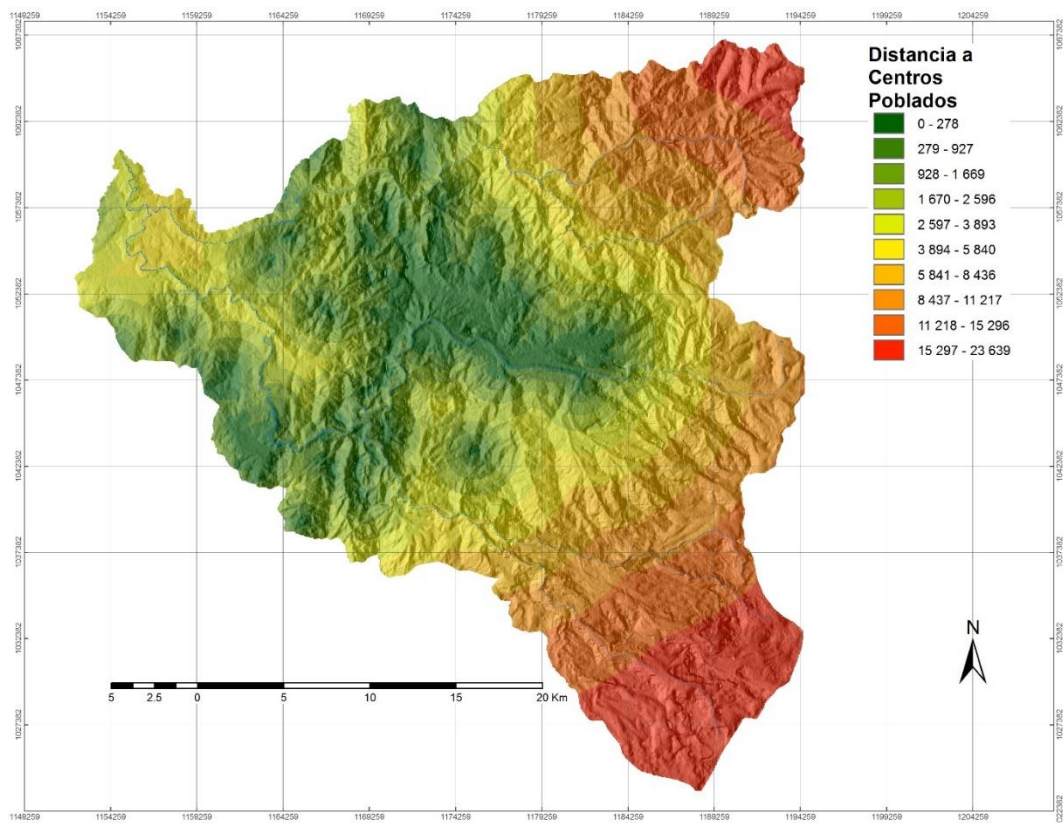


Figura 42. Distancia a centros poblados

3.1.2.3.4. Distancia a ríos y cauces

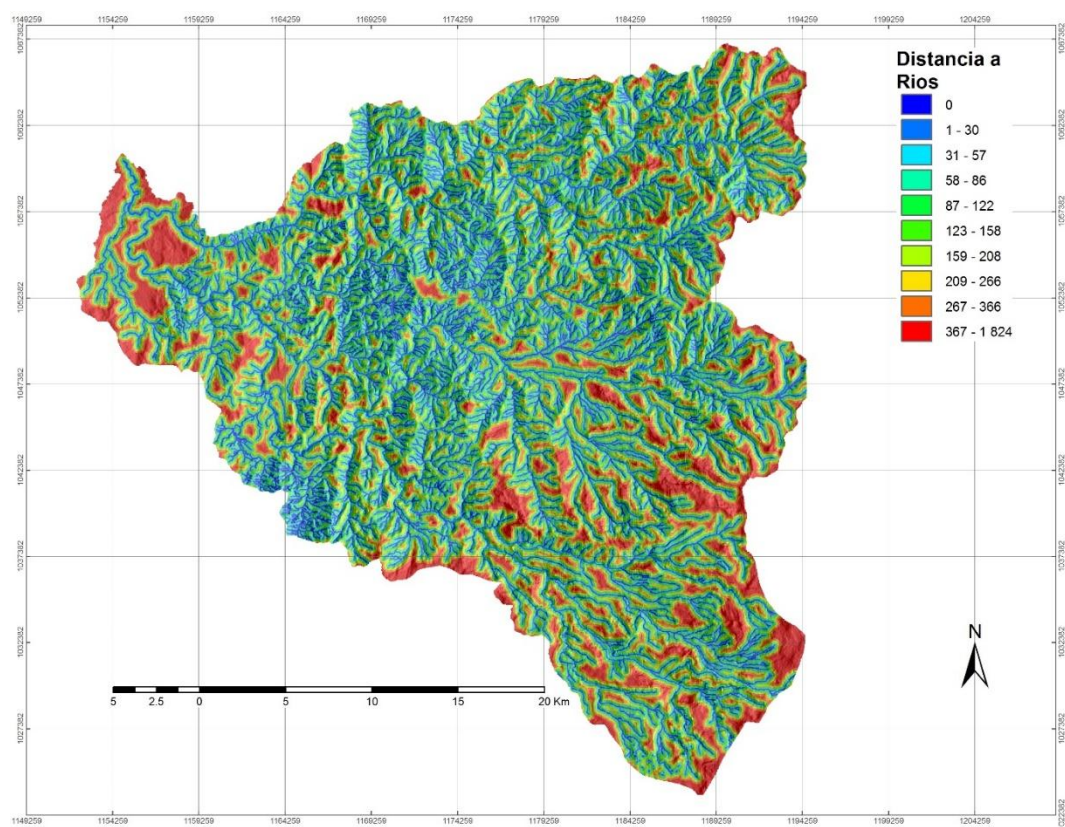


Figura 43. Distancia a ríos y cauces

3.1.3. Muestra de análisis

Con la información disponible de la cuenca del río Chinchiná se conforma una muestra de datos de 234 eventos de deslizamiento, que constituyen uno de los dos grupos sobre los que se hará el análisis. El otro grupo está constituido por otros 234 puntos elegidos aleatoriamente en el área dónde no hay eventos registrados. En total se tienen 468 puntos que conforman la muestra de análisis constituida en dos grupos: estable ($desl=0$) e inestable ($desl=1$).

3.1.4. Métodos de agregación

3.1.4.1. Función Discriminante De Susceptibilidad A Deslizamientos

Es posible elaborar varios modelos a partir de diferentes combinaciones de variables. Un camino razonable es utilizar inicialmente todas las variables y generar un primer modelo para posteriormente valorar la exclusión de algunas de ellas en modelos posteriores. A continuación se describen los pasos para construir un primer modelo por este método.

Un paso preliminar es hacer un análisis de correlaciones. Con el propósito de remover variables redundantes (altamente correlacionadas) de los datos, se calcula la matriz de correlaciones que aparece en la Tabla 13. La matriz ofrece una visión de la interrelación entre las variables de entrada.

Tabla 13. Matriz de correlaciones

	asp	dvia	curv	prft	prfl	dem	dfal	dpob	drio	flac	file	geom	inso	se2p	slop	mpar	cobe
asp	1	0.247	0.097	0.135	-0.046	0.243	-0.042	0.034	0.028	0.066	0.038	0.075	0.010	0.232	0.185	0.139	-0.010
dvia	0.247	1	-0.101	-0.042	0.129	0.390	0.292	0.167	0.184	-0.051	-0.050	-0.238	0.042	0.081	0.065	0.457	-0.029
curv	0.097	-0.101	1	0.864	-0.909	-0.028	-0.150	0.048	-0.029	-0.067	-0.092	-0.097	0.047	-0.186	-0.169	-0.193	-0.057
prft	0.135	-0.042	0.864	1	-0.575	-0.040	-0.170	0.028	-0.088	0.003	-0.028	-0.038	0.087	-0.237	-0.256	-0.153	-0.029
prfl	-0.046	0.129	-0.909	-0.575	1	0.013	0.103	-0.055	-0.027	0.111	0.127	0.127	-0.005	0.105	0.063	0.187	0.069
dem	0.243	0.390	-0.028	-0.040	0.013	1	0.480	0.444	0.258	-0.046	-0.066	-0.140	0.076	0.110	0.073	0.400	0.419
dfal	-0.042	0.292	-0.150	-0.170	0.103	0.480	1	0.528	0.278	-0.043	-0.044	-0.407	0.062	-0.039	-0.036	0.326	0.327
dpob	0.034	0.167	0.048	0.028	-0.055	0.444	0.528	1	0.210	-0.055	-0.056	-0.584	0.083	-0.080	-0.074	0.055	0.176
drio	0.028	0.184	-0.029	-0.088	-0.027	0.258	0.278	0.210	1	-0.125	-0.135	-0.186	0.195	-0.027	-0.035	0.230	0.149
flac	0.066	-0.051	-0.067	0.003	0.111	-0.046	-0.043	-0.055	-0.125	1	0.992	0.002	0.065	-0.117	-0.106	0.042	0.037
file	0.038	-0.050	-0.092	-0.028	0.127	-0.066	-0.044	-0.056	-0.135	0.992	1	-0.002	0.066	-0.127	-0.112	0.065	0.031
geom	0.075	-0.238	-0.097	-0.038	0.127	-0.140	-0.407	-0.584	-0.186	0.002	-0.002	1	-0.061	0.150	0.114	0.166	0.065
inso	0.010	0.042	0.047	0.087	-0.005	0.076	0.062	0.083	0.195	0.065	0.066	-0.061	1	-0.706	-0.790	0.131	0.126
se2p	0.232	0.081	-0.186	-0.237	0.105	0.110	-0.039	-0.080	-0.027	-0.117	-0.127	0.150	-0.706	1	0.973	0.019	0.009
slop	0.185	0.065	-0.169	-0.256	0.063	0.073	-0.036	-0.074	-0.035	-0.106	-0.112	0.114	-0.790	0.973	1	0.001	-0.021
mpar	0.139	0.457	-0.193	-0.153	0.187	0.400	0.326	0.055	0.230	0.042	0.065	0.166	0.131	0.019	0.001	1	0.373
cobe	-0.010	-0.029	-0.057	-0.029	0.069	0.419	0.327	0.176	0.149	0.037	0.031	0.065	0.126	0.009	-0.021	0.373	1

Como puede notarse, existen algunos factores que presentan altas correlaciones; en este caso debe analizarse por pares qué variable es conveniente conservar y cual debe descartarse. Las variables con más fuerte correlación se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Variables con correlaciones altas

Variables		Corr.
curv	prft	0.864
curv	prfl	-0.909
prft	prfl	-0.575
dfal	dpob	0.528
dpob	geom	-0.584
flac	flle	0.992
inso	se2p	-0.706
inso	slope	-0.790
se2p	slope	0.973

El test de igualdad de medias entre grupos mide el potencial de cada variable independiente antes de que el modelo sea creado. Cada test muestra el resultado de un análisis one-way ANOVA para la variable independiente usando la variable de agrupación como factor. Si el valor de significancia es mayor a 0.10, la variable probablemente no contribuye al modelo. Los valores Lambda de Wilks son otra medida del potencial de la variable. Valores pequeños indican que la variable es mejor discriminando entre grupos. Los valores de Lambda de Wilks y el F de Fisher para cada variable se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Test de igualdad de Media entre grupos

Tests of Equality of Group Means						
var	Wilks' Lambda	F	df1	df2	Sig.	
dpob	0.703	197.289	1	466	0.000	
dfal	0.823	100.087	1	466	0.000	
dvia	0.839	89.621	1	466	0.000	
geom	0.859	76.352	1	466	0.000	
dem	0.898	52.735	1	466	0.000	
drío	0.954	22.299	1	466	0.000	
cobe	0.980	9.640	1	466	0.002	
inso	0.991	4.450	1	466	0.035	
slop	0.991	4.409	1	466	0.036	
mpar	0.993	3.165	1	466	0.076	
prft	0.995	2.553	1	466	0.111	
se2p	0.996	2.061	1	466	0.152	
curv	0.996	2.047	1	466	0.153	
flac	0.996	1.926	1	466	0.166	
flle	0.997	1.360	1	466	0.244	
prfl	0.997	1.181	1	466	0.278	
asp	1.000	0.223	1	466	0.637	

Los gráficos correspondientes a los valores de la Tabla 15 permiten visualizar de mejor manera el grado de influencia de los factores de entrada en el modelo. En el caso del F de Fisher (Figura 44), para valores bajos, empiezan a perder influencia los factores; el caso del Lambda de Wilks (Figura 45) es en sentido inverso, a partir de cierto valor (alto) los factores ya no aportan. El punto de corte se establece en valores de significancia por encima de 0.10, en este caso, a partir de la variable prft.

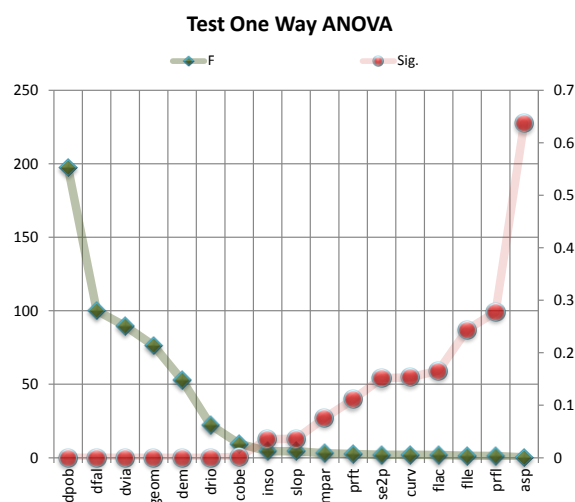


Figura 44. Test de igualdad de medias entre grupos (F de Fisher)

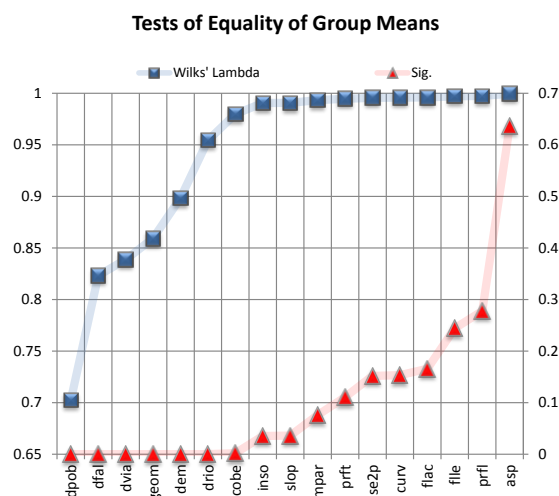


Figura 45. Test de igualdad de medias entre grupos (Lambda de Wilks)

El análisis de varianza lleva a descartar las variables *asp*, *prfi*, *file*, *flac*, *curv*, *se2p*, *prft*, que aparecen en color azul en la Tabla 15, dado su bajo poder discriminante.

La correlación de los predictores o colinealidad se evalúa usando la matriz de covarianza entre grupos (Tabla 16). Una inspección de la correlación de las covarianzas muestra las correlaciones altas entre los predictores *dem*, *dfal* y *dpob*, y *slop* e *inso*.

Tabla 16. Correlación de covarianzas

	dvia	dem	dfal	dpob	drio	geom	inso	slop	mpar	cobe
dvia	1	0.402	0.320	0.379	0.027	-0.303	-0.089	0.139	0.028	-0.125
dem	0.402	1	0.795	0.751	0.127	-0.507	-0.076	0.119	-0.010	-0.005
dfal	0.320	0.795	1	0.816	0.224	-0.641	-0.080	0.066	-0.023	-0.050
dpob	0.379	0.751	0.816	1	0.152	-0.580	-0.051	0.041	-0.097	-0.058
drio	0.027	0.127	0.224	0.152	1	-0.143	0.010	-0.021	0.035	0.009
geom	-0.303	-0.507	-0.641	-0.580	-0.143	1	0.112	-0.083	0.224	0.198
inso	-0.089	-0.076	-0.080	-0.051	0.010	0.112	1	-0.840	0.085	0.126
slop	0.139	0.119	0.066	0.041	-0.021	-0.083	-0.840	1	-0.041	-0.080
mpar	0.028	-0.010	-0.023	-0.097	0.035	0.224	0.085	-0.041	1	0.376
cobe	-0.125	-0.005	-0.050	-0.058	0.009	0.198	0.126	-0.080	0.376	1

Ante esta situación, es conveniente hacer un razonamiento: Considérese por ejemplo una variable de “cobertura vegetal” y otra de elevación. La vegetación puede variar sistemáticamente según la elevación. Un supuesto de independencia condicional de estas dos capas no es razonable. En ese caso debe valorarse cómo son afectados los patrones de predicción si el supuesto de independencia condicional es violado (Chung; 2006).

Dado el origen diferente de las variables *dem*, *dpob* y *dfal*, el hecho que ninguna de ellas se deriva de otra, y su alta influencia en el proceso discriminante de celdas estables e inestables (ver tablas y gráficas anteriores), se decide continuar el análisis con todas ellas, para posteriormente elaborar modelos alternativos descartando algunas y comparar los resultados. En el caso de *slop* e *inso*, se opta por probar con cada una también.

El test Box's M es utilizado para probar la homogeneidad de las matrices de covarianza, chequea el supuesto de igualdad de covarianzas entre grupos. Los log determinantes (Tabla 17) son una medida de la variabilidad de los grupos. Valores altos corresponden a grupos más variables. Diferencias grandes en los valores indican que los grupos tienen diferentes matrices de covarianza.

Tabla 17. Chequeo de homogeneidad de covarianzas

Log Determinants		
desl	Rank	Log Determinant
0	10	87.70
1	10	76.48
Pooled within-groups	10	84.72

Cuando el valor Box's M (Tabla 18) es significativo (Sig.=0), se debe chequear el modelo discriminante mediante matrices separadas para verificar si se obtienen valores de clasificación diferentes. En este caso, los modelos con matrices separadas produjeron resultados de clasificación muy similares o en algunos casos inferiores a los obtenidos con un solo grupo.

Tabla 18. Test Box M

Box's M		1227.832
F	Approx.	21.824
	df1	55
	df2	701264.161
	Sig.	0.000

El Lambda de Wilks (Tabla 19) es una medida de la manera en que cada función separa los casos en grupos. Es igual a la proporción de varianza total en los coeficientes discriminantes no explicada por diferencias entre los grupos. Pequeños valores de lambda indican gran poder discriminante de la función. El Chi-cuadrado asociado chequea la hipótesis de que las medias de las funciones son iguales entre grupos. Valores pequeños de Sig. Indican que la función discriminante tiene resultados mejores que el azar en la separación entre grupos.

Tabla 19. Lambda de Wilks para el modelo general

Wilks' Lambda				
Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
1	0.636	208.370	10	0.000

La tabla de valores propios (Tabla 20) proporciona información sobre la eficacia de la función discriminante. Cuando existen dos grupos, la correlación canónica es la medida más útil en la tabla, y es equivalente a la correlación de Pearson entre los coeficientes discriminantes y los grupos.

Tabla 20. Valores propios y correlación para la función discriminante

Eigenvalues				
Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	0.571	100	100	0.603

Hay varias tablas que evalúan la contribución de cada variable al modelo, incluyendo los tests de igualdad de medias grupales, los coeficientes de la función discriminante y la matriz de estructura.

La matriz de estructura (Tabla 21) muestra la correlación de cada predictor con la función discriminante y constituye una prueba de la importancia que cada variable tiene dentro del modelo. El orden en esta matriz es igual al sugerido por el test de igualdad de medias grupales y es diferente del que aparece en la tabla de coeficientes estandarizados que constituye la ecuación del modelo lineal.

Tabla 21. Matriz de estructura del modelo

Structure Matrix	
dpob	0.861
dfal	0.613
dvia	0.580
geom	-0.535
dem	0.445
drio	0.289
cobe	-0.190
inso	-0.129
slop	0.129
mpar	-0.109

Los coeficientes estandarizados (Tabla 22) permiten comparar variables medidas en diferentes escalas. Coeficientes con valores absolutos altos corresponden a variables con alto poder discriminante. Puede observarse que dentro de las variables más influyentes individualmente se encuentran *dpob*, *dem*, *dvia*, *slope* y *drio*.

Tabla 22. Coeficientes canónicos estandarizados

Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients	
dvia	0.350
dem	-0.560
dfal	-0.068
dpob	1.140
drio	0.188
geom	-0.052
inso	0.025
slop	0.120
mpar	0.022
cobe	-0.079

El modelo lineal obtenido con la función discriminante se ensambla con los coeficientes canónicos de la Tabla 23.

Tabla 23. Coeficientes de la función discriminante

Canonical Discriminant Function Coefficients	
dvia	0.001
dem	-0.001
dfal	0.000
dpob	0.000
drio	0.001
geom	-0.009
inso	0.003
slop	0.011
mpar	0.006
cobe	-0.006
(Constant)	0.029

La Tabla 24 resume los resultados del modelo inicial en cuanto a capacidad de clasificación de casos. Puede leerse que el modelo acierta en la clasificación del 65% de las celdas estables, clasifica correctamente el 95.7% de las celdas inestables, y en total, tiene un acierto del 80.3% de casos.

Tabla 24. Resultados de clasificación del modelo inicial

Función discriminante desl		Resultados de la clasificación		
		0	1	Total
Count	0	152	82	234
	1	10	224	234
%	0	65.0	35.0	100
	1	4.3	95.7	100

La ecuación lineal obtenida se ha aplicado a toda el área bajo estudio y sus valores se han normalizado entre 0 y 1. Este procedimiento hace que la asignación posterior de categorías de susceptibilidad sea más sencillo. El mapa resultado de esta clasificación se presenta a continuación (Figura 46). Se trata de un mapa ráster con valores entre cero y uno que refleja el grado relativo de susceptibilidad de cada celda del terreno.

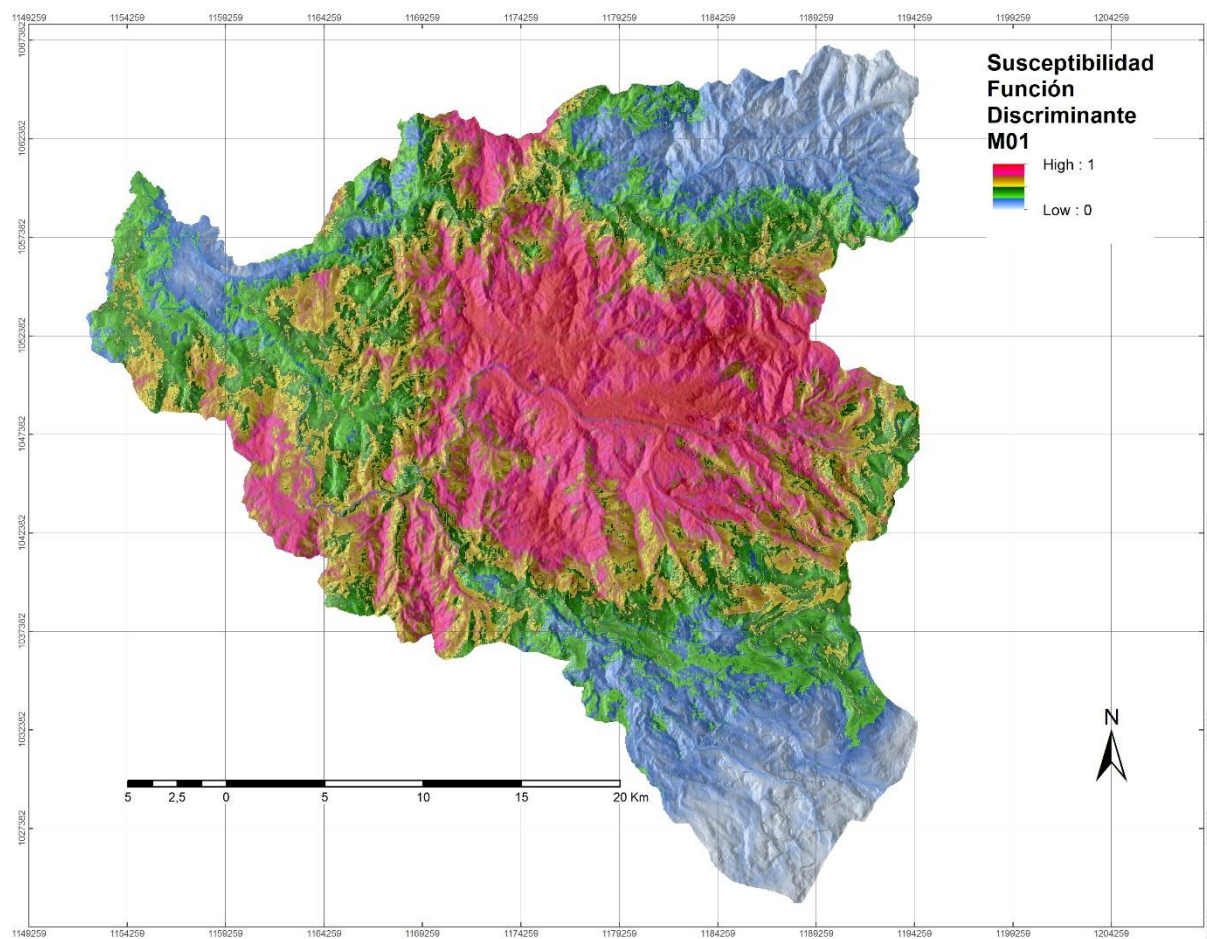


Figura 46. Susceptibilidad mediante una función discriminante

3.1.4.1.1. Diferentes modelos discriminantes probados

Se han elaborado siete modelos diferentes cambiando las variables incluidas en cada caso y se ha probado el desempeño en la clasificación de los datos. La configuración de cada uno de los modelos probados se presenta en la Tabla 25. El modelo MOD1 (DIS01) ya se presentó junto a la descripción del procedimiento en las páginas anteriores. Los resultados para los mejores tres modelos aparecen en la siguiente gráfica en términos de sensibilidad, especificidad y precisión.

Los resultados de clasificación de datos se presentan según tres criterios: se denomina especificidad del modelo a la capacidad para clasificar correctamente celdas estables; sensibilidad a la capacidad para clasificar correctamente deslizamientos; y precisión al total correctamente clasificado.

Tabla 25. Diferentes modelos de función discriminante probados

Variable	MOD1	MOD2	MOD3	MOD4	MOD5	MOD6	MOD7
1 dpob	X	X			X	X	X
2 dfal	X		X	X		X	X
3 dvia	X	X	X	X	X	X	X
4 geom	X		X	X			
5 dem	X	X	X	X	X	X	X
6 drío	X	X	X	X	X	X	X
7 cobe	X	X	X	X	X	X	X
8 inso	X	X	X			X	
9 slop	X			X	X		X
10 mpar	X	X	X	X	X	X	X
11 prft							
12 se2p							
13 curv							
14 flac							
15 fllc							
16 prfl							
17 asp							

Los tres mejores modelos obtenidos fueron MOD1 (DIS01, Figura 46), MOD3 (DIS02, Figura 47) y MOD5 (DIS03, Figura 48) exhiben parámetros de rendimiento similares como se observa en la Tabla 26. El mejor modelo en capacidad de clasificación y sensibilidad es DIS03.

Modelo DIS02

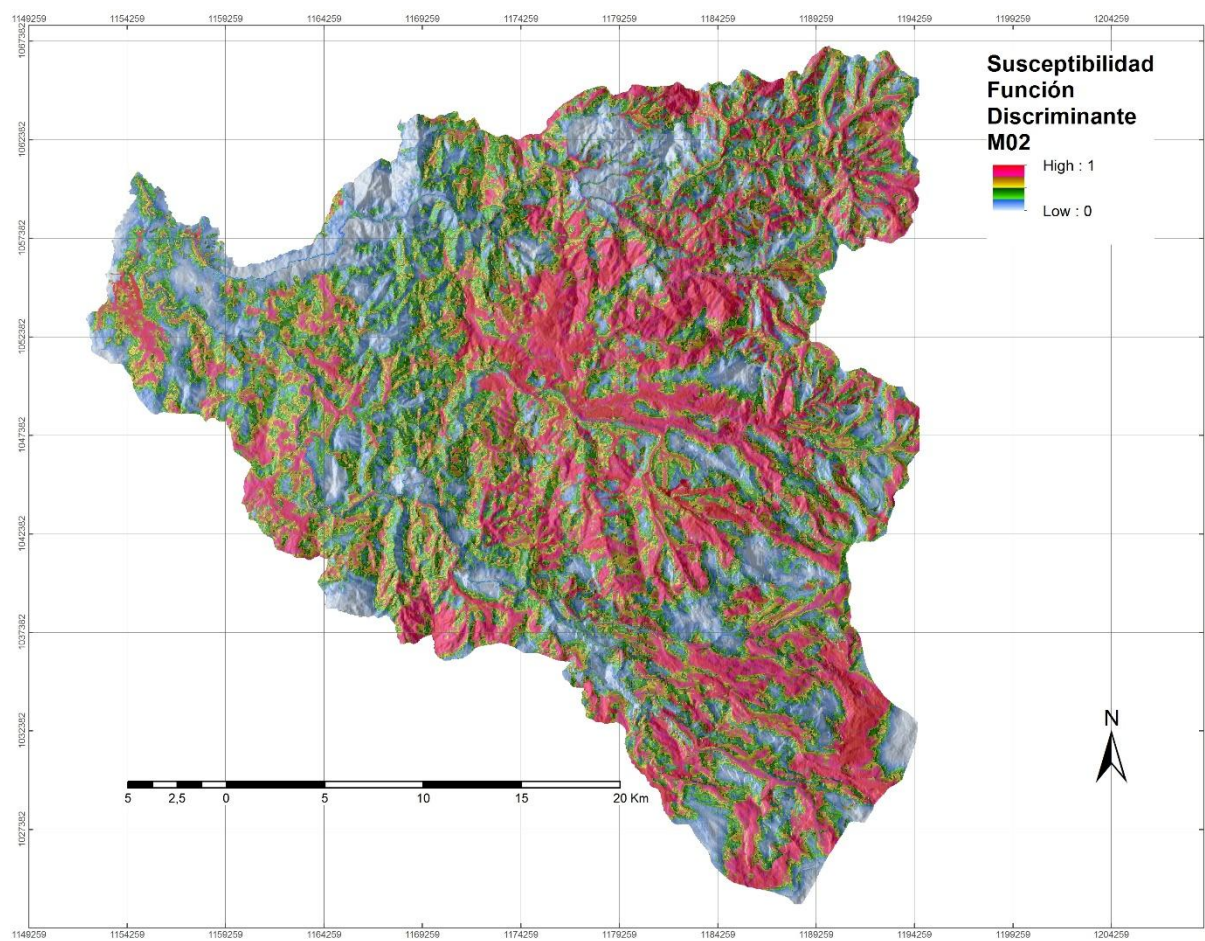


Figura 47. Modelo función discriminante MOD2

Modelo DIS03

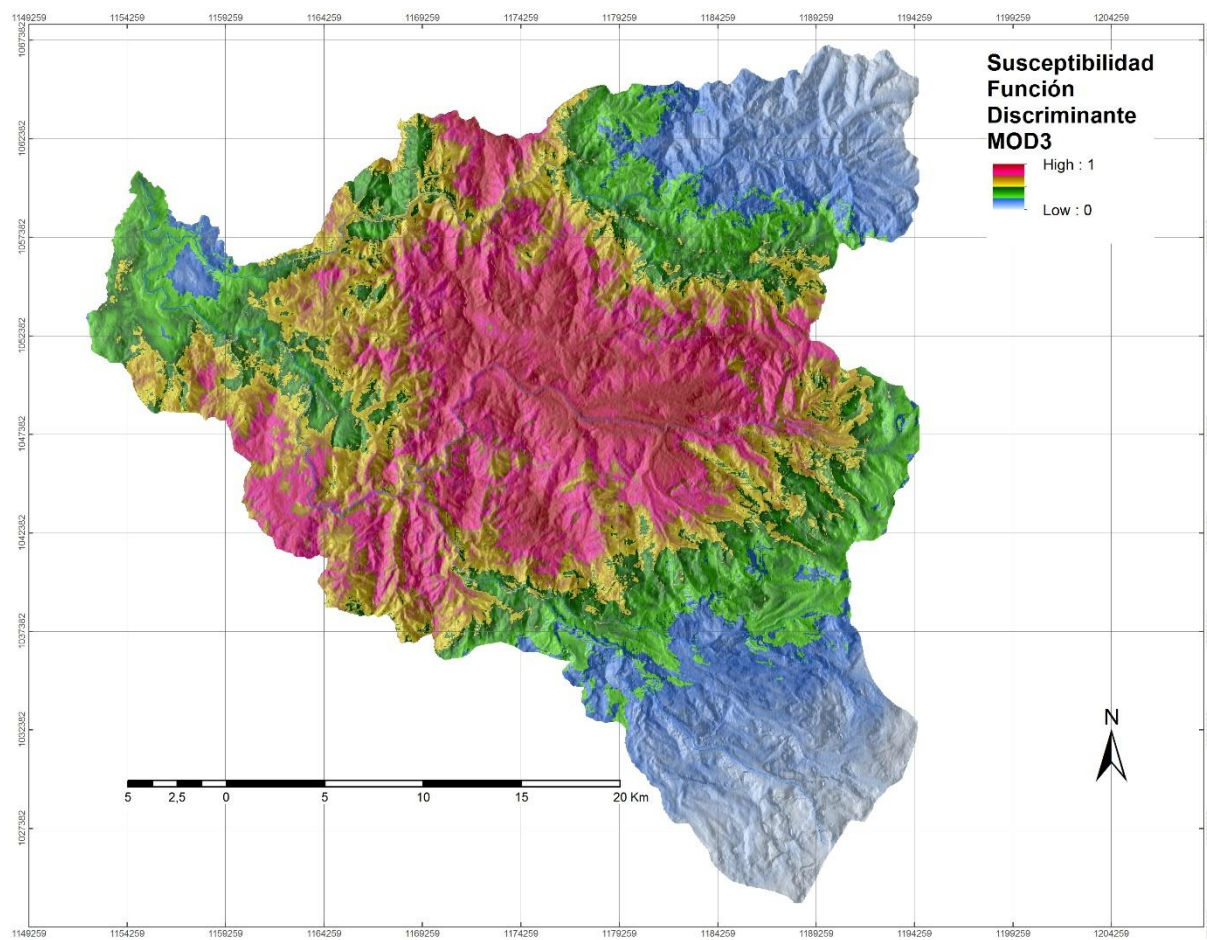


Figura 48. Modelo función discriminante MOD5

En cuanto a sus capacidades de clasificación, en la Figura 49 se presentan las curvas ROC obtenidas para cada modelo. Como se mencionó en la Sección 2.7 de esta tesis, la curva es un dibujo de la probabilidad de tener un verdadero positivo (un valor correctamente predicho) versus la probabilidad de un falso positivo (un valor incorrectamente predicho). Un modelo ideal muestra un valor del área bajo la curva AUC cercano a 1, mientras un valor cercano a 0,5 evidencia un inadecuado modelo.

Los valores del área bajo la curva para el caso de celdas inestables (deslizamientos), se muestran en la Tabla 26 bajo el nombre AUC_D; de allí se desprende que el modelo con mejor capacidad de clasificación es DIS03, con un valor AUC de 0.883, seguido muy de cerca por los otros dos modelos. En cuanto a clasificación de celdas estables, los valores AUC_E están cercanos a 0.5 en los tres casos, siendo deseables valores tendientes a cero. Sin embargo, para efectos de elección de un modelo de susceptibilidad a deslizamientos, es preferible aquel que acierte en clasificar correctamente celdas inestables que estables.

Tabla 26. Parámetros de rendimiento modelos discriminantes

	DIS01	DIS02	DIS03
AUC_D	0,882	0,881	0,883
AUC_E	0,487	0,487	0,487
fn	5	5	3
tp	229	229	231
tn	116	118	116
fp	118	116	118
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,737	0,741	0,741
SENSIBILIDAD	0,979	0,979	0,987
ESPECIFICIDAD	0,504	0,496	0,504
GILBERT SCORE	0,651	0,654	0,656
PEIRCE SKILL SCORE	-0,304	-0,296	-0,171
HEIDKE SKILL SCORE	0,474	0,483	0,483
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,957	0,958	0,974

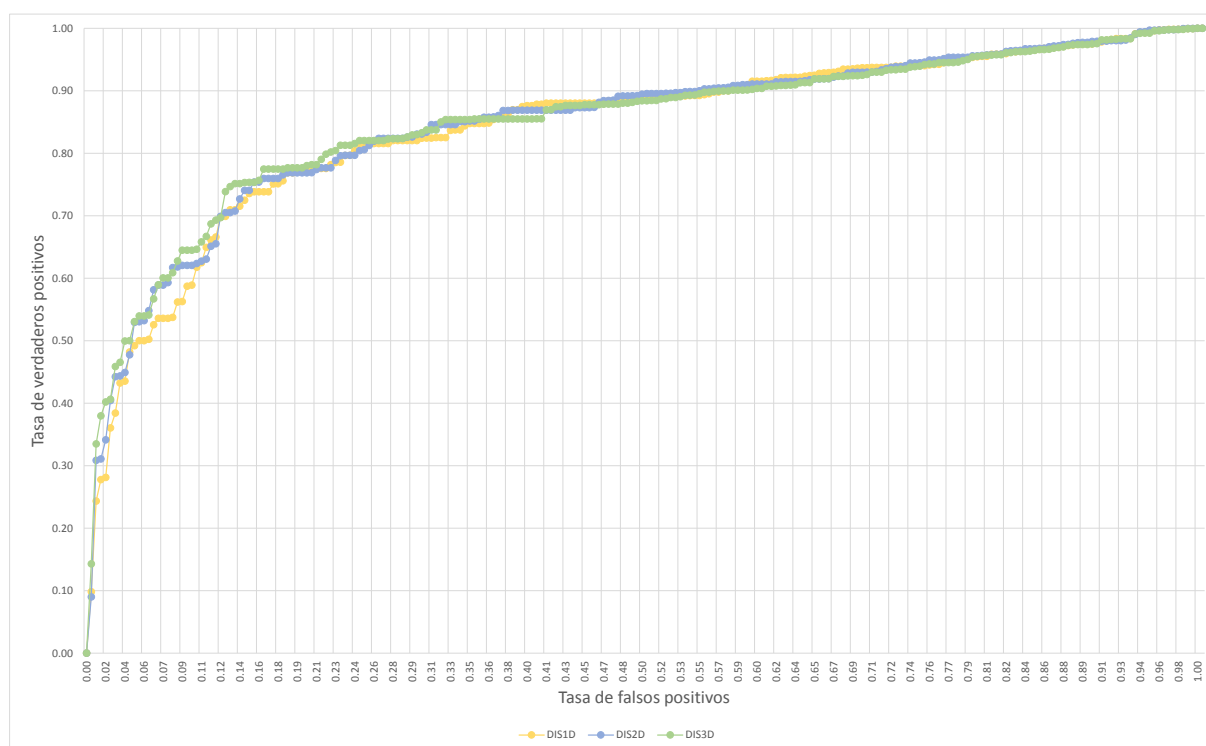


Figura 49. Curvas de rendimiento modelos discriminantes

3.1.4.1.2. *Análisis De Componentes Principales*

Como complemento a este método estadístico, buscando entender mejor la estructura de los factores que llevan a la generación de deslizamientos, se ha ejecutado un análisis de componentes principales sobre los datos , que pretende contestar básicamente dos preguntas: ¿Cuántos componentes o factores son necesarios para representar las variables?, ¿Qué representan estos componentes?.

En total, se obtienen cuatro componentes principales, que explican en conjunto el 61.2% de la varianza total (Tabla 27), siguiendo el criterio conocido como regla de Káiser, según el cual, se eligen los componentes con valores propios mayores a la unidad.

Tabla 27. Varianza explicada por los componentes principales

Varianza explicada por componente						
Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	3,00	30,04	30,04	3,00	30,04	30,04
2	1,79	17,92	47,97	1,79	17,92	47,97
3	1,56	15,61	63,58	1,56	15,61	63,58
4	1,07	10,68	74,25	1,07	10,68	74,25
5	0,83	8,27	82,52			
6	0,53	5,28	87,81			
7	0,43	4,32	92,13			
8	0,37	3,74	95,86			
9	0,24	2,37	98,24			
10	0,18	1,76	100,00			

Las comunales (Tabla 28) indican el monto de varianza que es contemplado por los componentes para cada variable.

Tabla 28. Comunidades para las variables

Comunalidades		
	Initial	Extraction
dvia	1	0,85
dem	1	0,65
dfal	1	0,66
dpob	1	0,77
drio	1	0,27
geom	1	0,82
inso	1	0,90
slop	1	0,89
mpar	1	0,78
cobe	1	0,82

El test KMO (Tabla 29) es un estadístico que muestra la proporción de varianza que puede obedecer a los factores analizados. Mientras más se acerque a 1 el valor, que el análisis de componentes principales resulta más útil; valores menores a 0.5 desaconsejarían la aplicación del método. El test de esfericidad de Bartlett contrasta la hipótesis de que la matriz de correlación sea una matriz identidad, lo cual indicaría que las variables no están relacionadas y el análisis sería inadecuado. Pequeños valores de niveles de significancia (<0.05) indican que el análisis factorial puede ser útil.

Tabla 29. Test KMO y de Bartlett

KMO and Bartlett's Test		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,61
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	830,93
	df	45
	Sig.	3,2456E-145

La matriz de componentes principales (Tabla 30) ofrece una idea de la importancia de los diferentes factores dentro de cada componente principal obtenido. Para facilidad en su interpretación, estos valores se han graficado en la Figura 50.

Tabla 30. Matriz de componentes principales

	Componente			
	1	2	3	4
<i>dvia</i>	0,535	0,216	0,084	-0,714
<i>dem</i>	0,750	0,227	0,166	0,111
<i>dfal</i>	0,778	0,100	-0,156	0,144
<i>dpob</i>	0,679	-0,020	-0,512	0,216
<i>drio</i>	0,496	-0,073	0,049	-0,134
<i>geom</i>	-0,474	0,117	0,755	0,089
<i>inso</i>	0,276	-0,878	0,226	-0,077
<i>slop</i>	-0,143	0,929	-0,075	0,035
<i>mpar</i>	0,541	0,166	0,640	-0,229
<i>cobe</i>	0,477	0,059	0,448	0,626

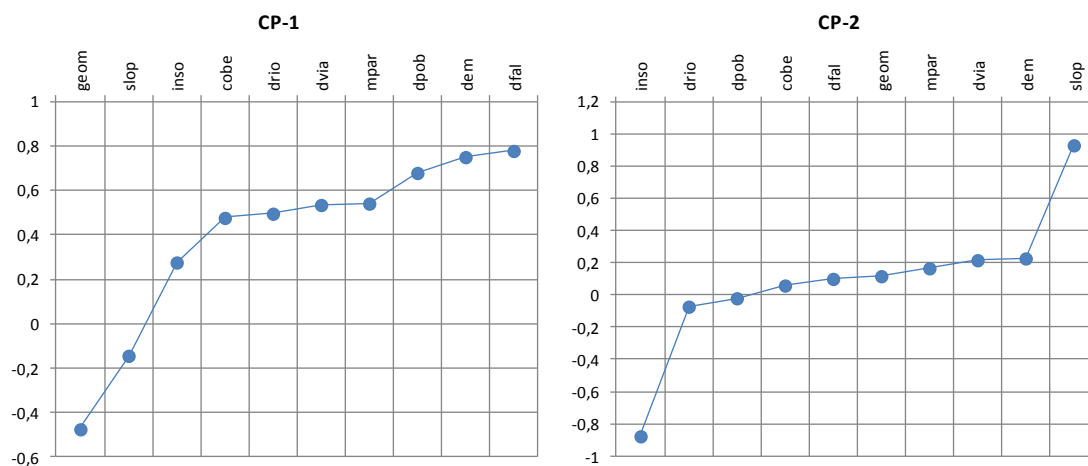
En el componente 1 (30% de varianza) tienen influencia directa las variables *dfal*, *dem*, *dpob*, *drio*. Se trata de un componente relacionado con las variables de distancias a elementos y elevación.

En el componente 2 (17.9% de varianza) influyen las variables *slop* e *inso*, variables relacionadas con la pendiente y el grado de insolación que llega al terreno; es decir, variables de “forma” de la ladera.

En el componente 3 (15.6% de varianza) las variables más relevantes son *geom* y *mpar*, variables relacionadas con características de Geología/suelos

En el componente 4 (10.7% de varianza) la variable más importante es *dvia*, seguida por cobertura *cobe*.

Resulta claro que el problema de deslizamientos en la cuenca no es fácil de simplificar en unos cuantos factores causales, es más bien una combinación de causas de diferentes orígenes, como puede verse en los componentes analizados: claramente la distancia a fallas, ríos, poblaciones y la elevación configuran un primer componente con mayor influencia. Variables que en algunos contextos pueden ser muy relevantes, como la pendiente, ocupa el segundo lugar en importancia junto con la insolación del terreno. Las características geológicas, que en análisis a escalas más detalladas o en otras áreas pueden ser muy relevantes, conforman el tercer componente en importancia. Y un cuarto componente con menor influencia, está relacionado con la distancia a vías y los usos del suelo (coberturas).



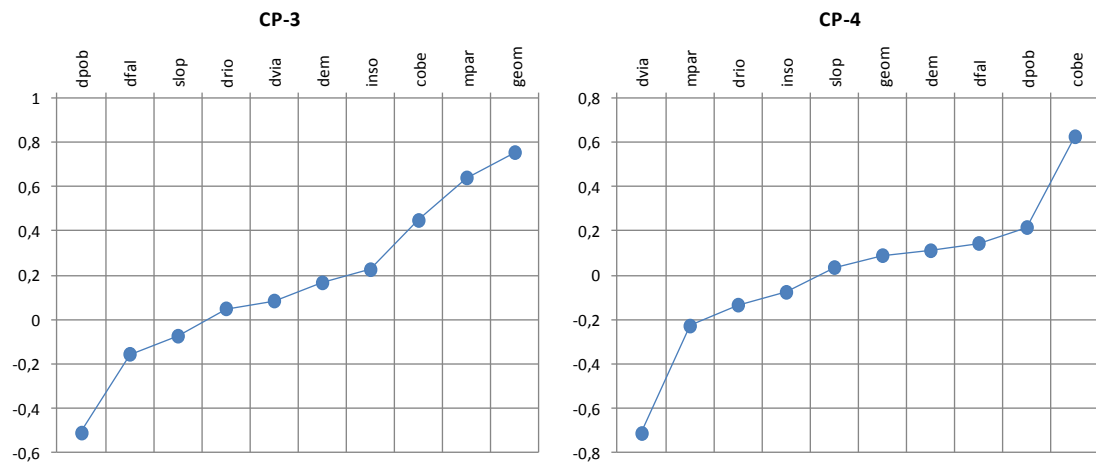
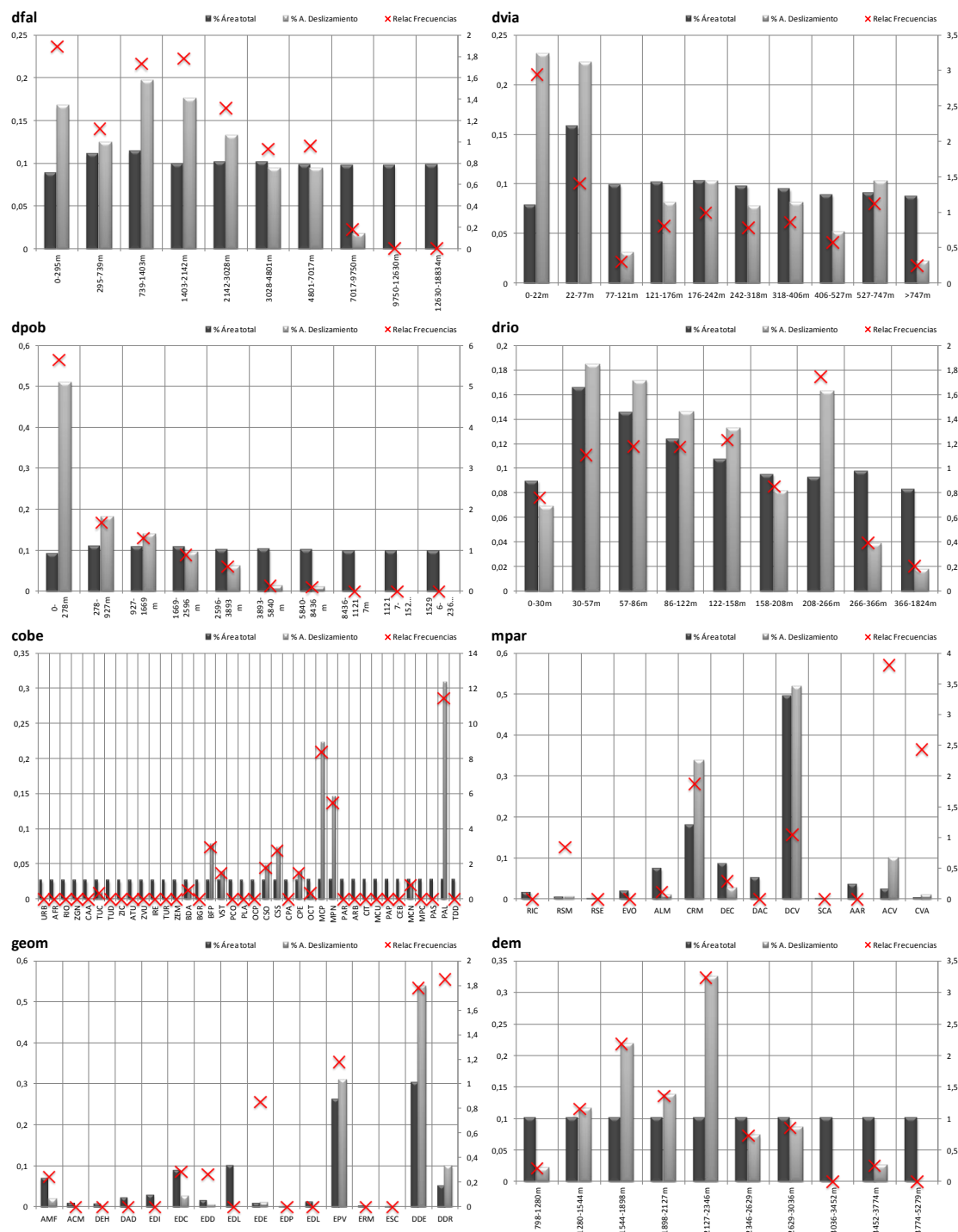


Figura 50. Componentes Principales

3.1.4.2. Método De Funciones De Favorabilidad

En la Figura 51 se presentan los valores de frecuencia relativa para el área con deslizamientos (gris claro) y para el área restante (gris oscuro) en el eje de la derecha, así como la relación de frecuencias para cada clase de cada uno de los factores (rojo) en el eje de la izquierda.



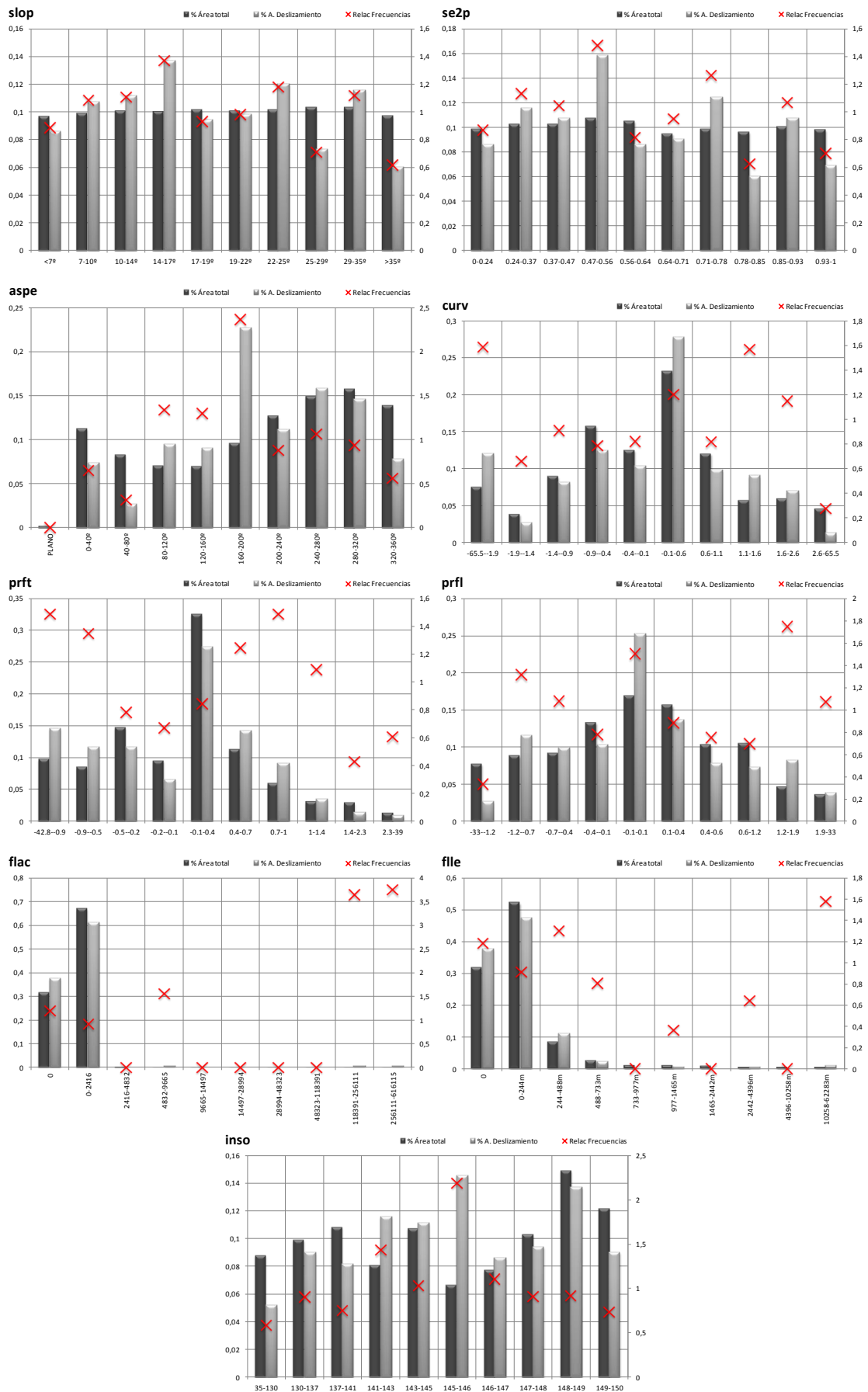


Figura 51. Frecuencia relativa para el área con deslizamientos (gris claro), para el área restante (gris oscuro), y relación de frecuencias para cada clase de cada uno de los factores (rojo)

3.1.4.2.1. Clases de cada variable con mayor influencia en la susceptibilidad

Los valores de frecuencia relativa por clases dentro de cada variable pueden utilizarse también para identificar el rango de valores de cada variable que más contribuyen a la susceptibilidad a deslizamiento. En la Tabla 31 se muestra para cada variable la clase que más influencia tiene en la aparición de deslizamientos, el valor de frecuencia relativa y el porcentaje de deslizamientos presente en esa clase. Valores altos de frecuencia relativa se relacionan con influencia muy marcada de esa clase en particular y mínima de las otras; valores bajos significan que las otras clases tienen influencia similar.

Tabla 31. Clase de cada variable más influyente

Factor	Clase más influyente	Frecuencia relativa	% de deslizamientos que caen en la clase
dfal	0 – 295 m	1.89	19.1
dvia	0 – 22 m	2.93	26.8
dpob	0 – 278 m	5.65	54.8
drio	208 – 266 m	1.74	17.8
cobe	PAL (Pastos Limpios)	11.4	30.4
mpar	ACV (Arenas y cenizas volcánicas)	3.81	36.6
geom	DDR (Desprendimientos, deslizamientos, reptación y escurrimientos difusos)	1.85	28.7
dem	2127 – 2364 m.s.n.m	3.24	32.5
slop	14 – 17°	1.37	7.5
se2p	0.47 – 0.56	1.48	8.6
aspe	160 – 200°	2.37	25.2
curv	-65.5 - -1.9 m/100	1.59	13.4
prft	-42.8 - -0.9 m/100	1.49	10.6
prfl	1.2 – 1.9 m/100	1.74	13.9
flac	256111 – 616115 pixels	3.75	33.9
flle	10258 – 62283 m	1.58	23.2
inso	145 - 146	2.19	15.2

Para obtener la combinación de los diferentes factores involucrados en el análisis y sus correspondientes valores de χ^2 , debe considerarse el supuesto de independencia, para lo cual se recurre al análisis estadístico ya expuesto en la sección anterior que da como resultado la elección de las variables que se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32. Diferentes modelos de relación de frecuencias probados

Variable	MOD1	MOD2	MOD3	MOD4	MOD5	MOD6	MOD7
1 dpob	X	X			X	X	X
2 dfal	X		X	X		X	X
3 dvia	X	X	X	X	X	X	X
4 geom	X		X	X			
5 dem	X	X	X	X	X	X	X
6 drio	X	X	X	X	X	X	X
7 cobe	X	X	X	X	X	X	X
8 inso	X	X	X			X	
9 slop	X			X	X		X
10 mpar	X	X	X	X	X	X	X

Utilizando la combinación de variables de la tabla, se han calculado los modelos correspondientes. Los mejores resultados se obtienen con las configuraciones MOD1 (RF01), MOD3 (RF02), MOD5 (RF03) y MOD7 (RF04).

En cuanto a sus capacidades de clasificación, en la Figura 52 se presentan las curvas ROC obtenidas para cada modelo. Como se mencionó en la sección 2 de esta tesis, la curva es un dibujo de la probabilidad de tener un verdadero positivo (un valor correctamente predicho) versus la probabilidad de un falso positivo (un valor incorrectamente predicho). Un modelo ideal muestra un valor del área bajo la curva AUC cercano a 1, mientras un valor cercano a 0,5 evidencia un inadecuado modelo

Los valores del área bajo la curva para el caso de celdas inestables (deslizamientos), se muestran en la Tabla 33 bajo el nombre AUC_D; de allí se desprende que el modelo con mejor capacidad de clasificación es RF01, con un valor AUC de 0.83, seguido muy de cerca por los modelos RF02 y RF03. En cuanto a clasificación de celdas estables, los valores AUC_E están cercanos a 0.5 en los tres casos, siendo deseables valores tendientes a cero. Sin embargo, para efectos de elección de un modelo de susceptibilidad a deslizamientos, es preferible aquel que acierte en clasificar correctamente celdas inestables que estables.

Tabla 33. Parámetros de rendimiento modelos de relación de frecuencias

	RF04	RF03	RF02	RF01
AUC_D	0,714	0,805	0,818	0,826
AUC_E	0,484	0,477	0,476	0,481
fn	29	20	17	19
tp	205	214	217	215
tn	117	119	126	124
fp	117	115	108	110
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,688	0,712	0,733	0,724
SENSIBILIDAD	0,876	0,915	0,927	0,919
ESPECIFICIDAD	0,500	0,491	0,462	0,470
GILBERT SCORE	0,584	0,613	0,635	0,625
PEIRCE SKILL SCORE	-0,466	-0,441	-0,403	-0,417
HEIDKE SKILL SCORE	0,376	0,423	0,466	0,449
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,752	0,834	0,874	0,855

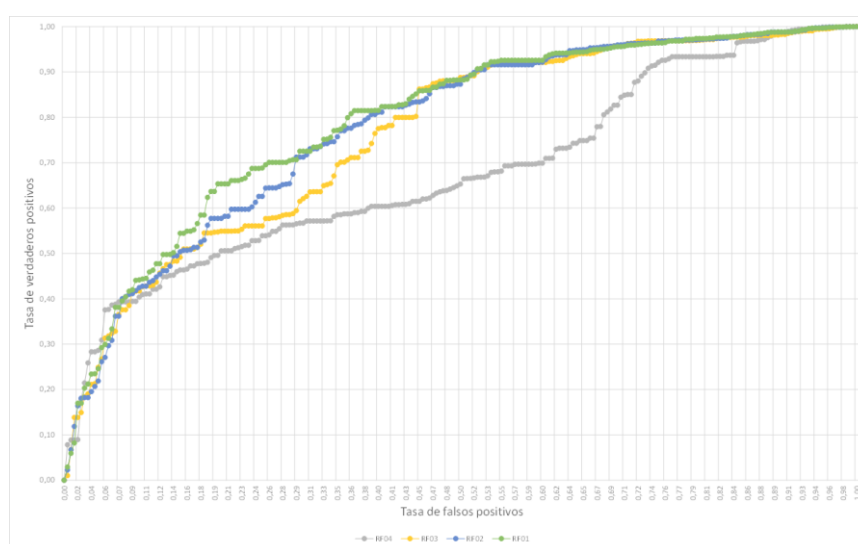


Figura 52. Curvas de rendimiento modelos de relación de frecuencias

Los mapas asociados a los modelos RF01 (MOD1), RF02 (MOD2), RF03 (MOD5), y RF04 (MOD7) se presentan en las páginas siguientes, desde la Figura 53 hasta la Figura 56.

3.1.4.2.2. *Modelo de relación de frecuencias MOD1*

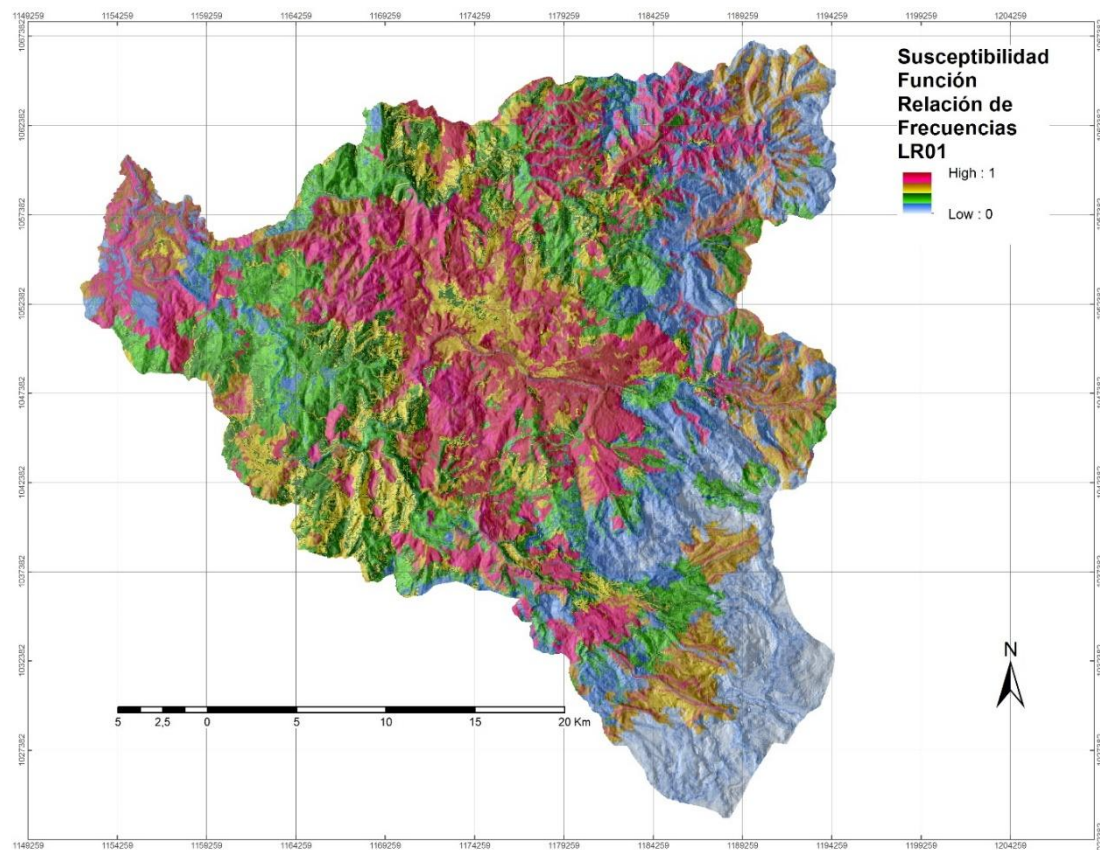


Figura 53. Modelo de relación de frecuencias MOD1

3.1.4.2.3. *Modelo de relación de frecuencias MOD2*

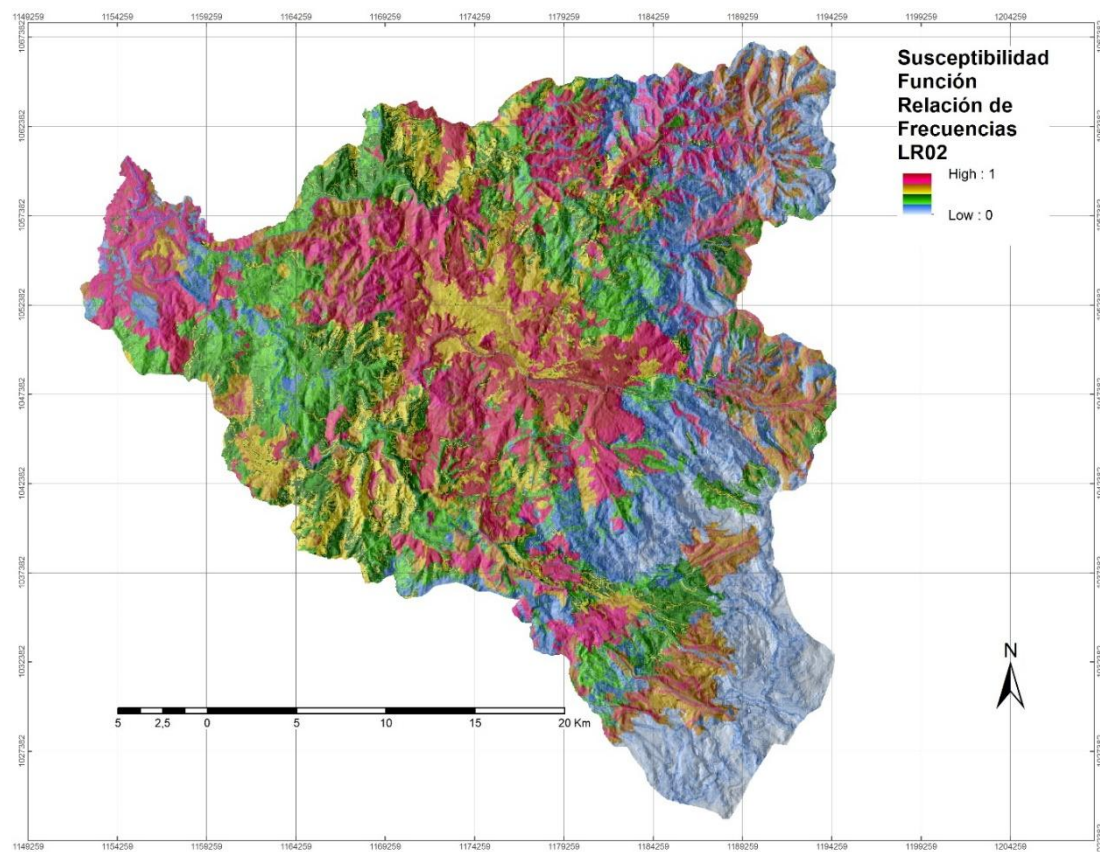


Figura 54. Modelo de relación de frecuencias MOD2

3.1.4.2.4. *Modelo de relación de frecuencias MOD5*

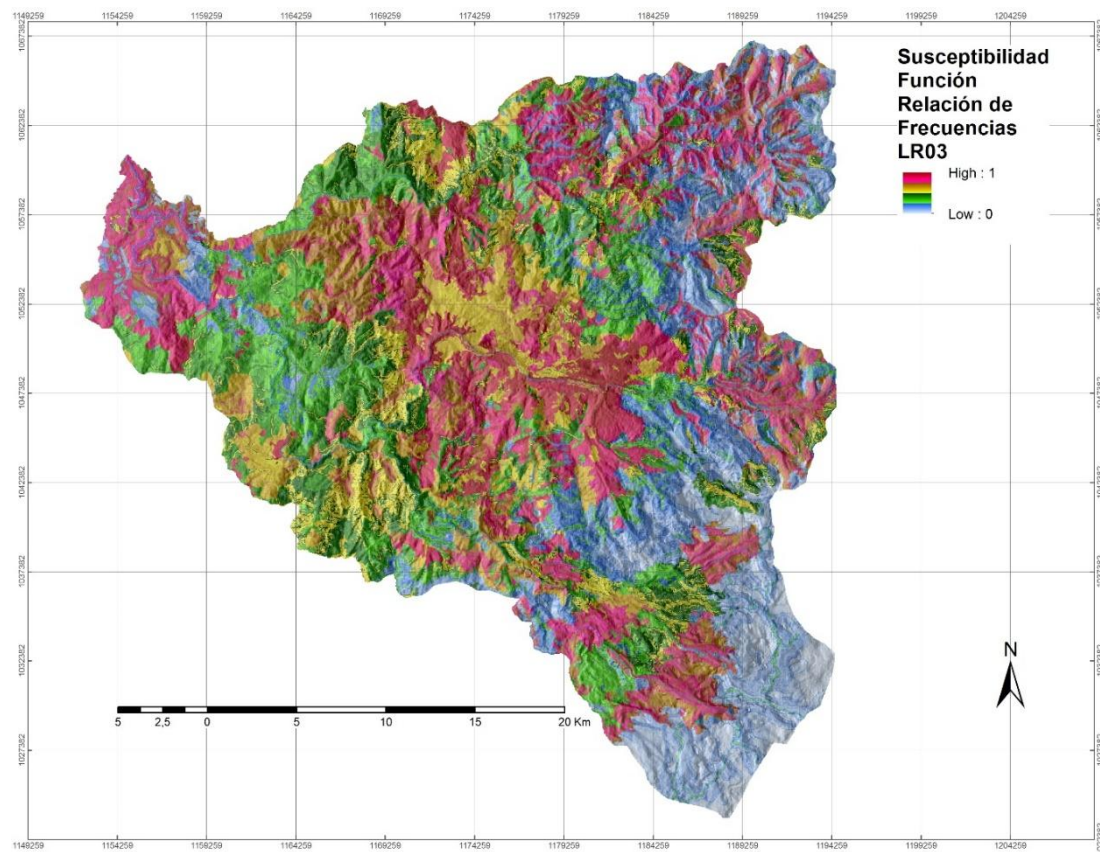


Figura 55. Modelo de relación de frecuencias MOD5

3.1.4.2.5. *Modelo de relación de frecuencias MOD7*

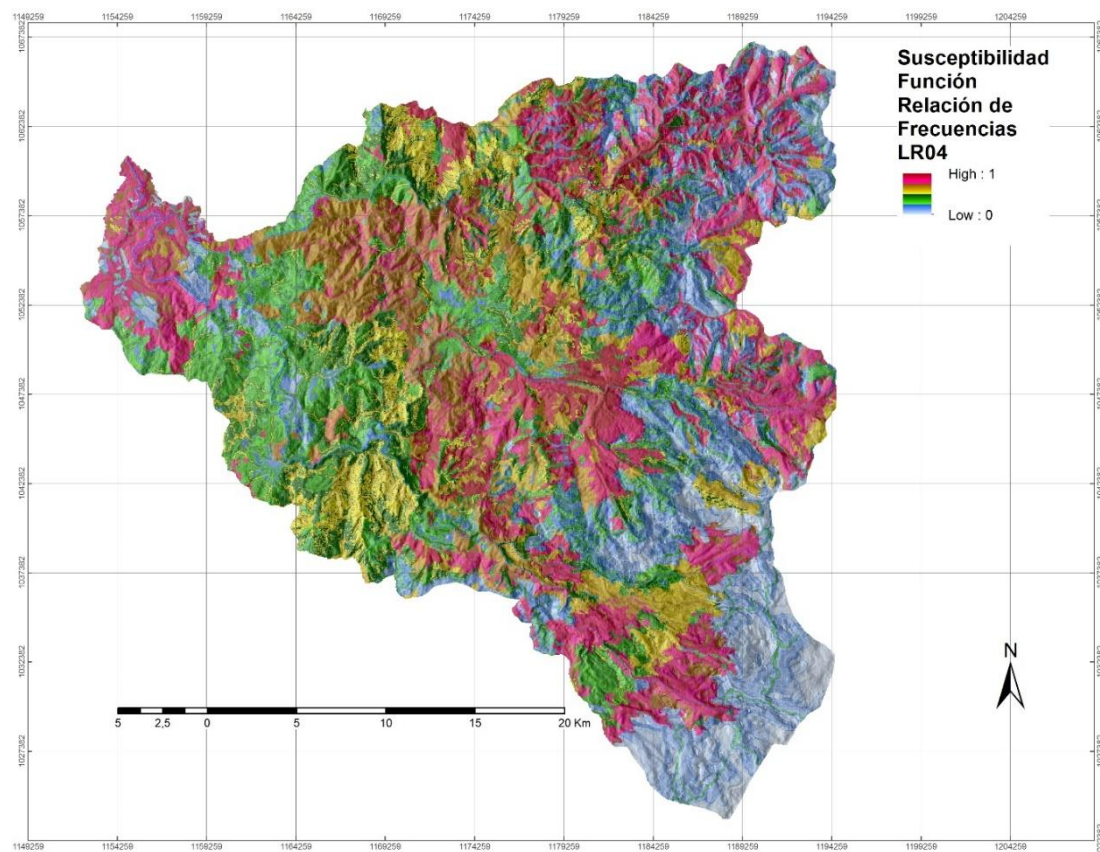
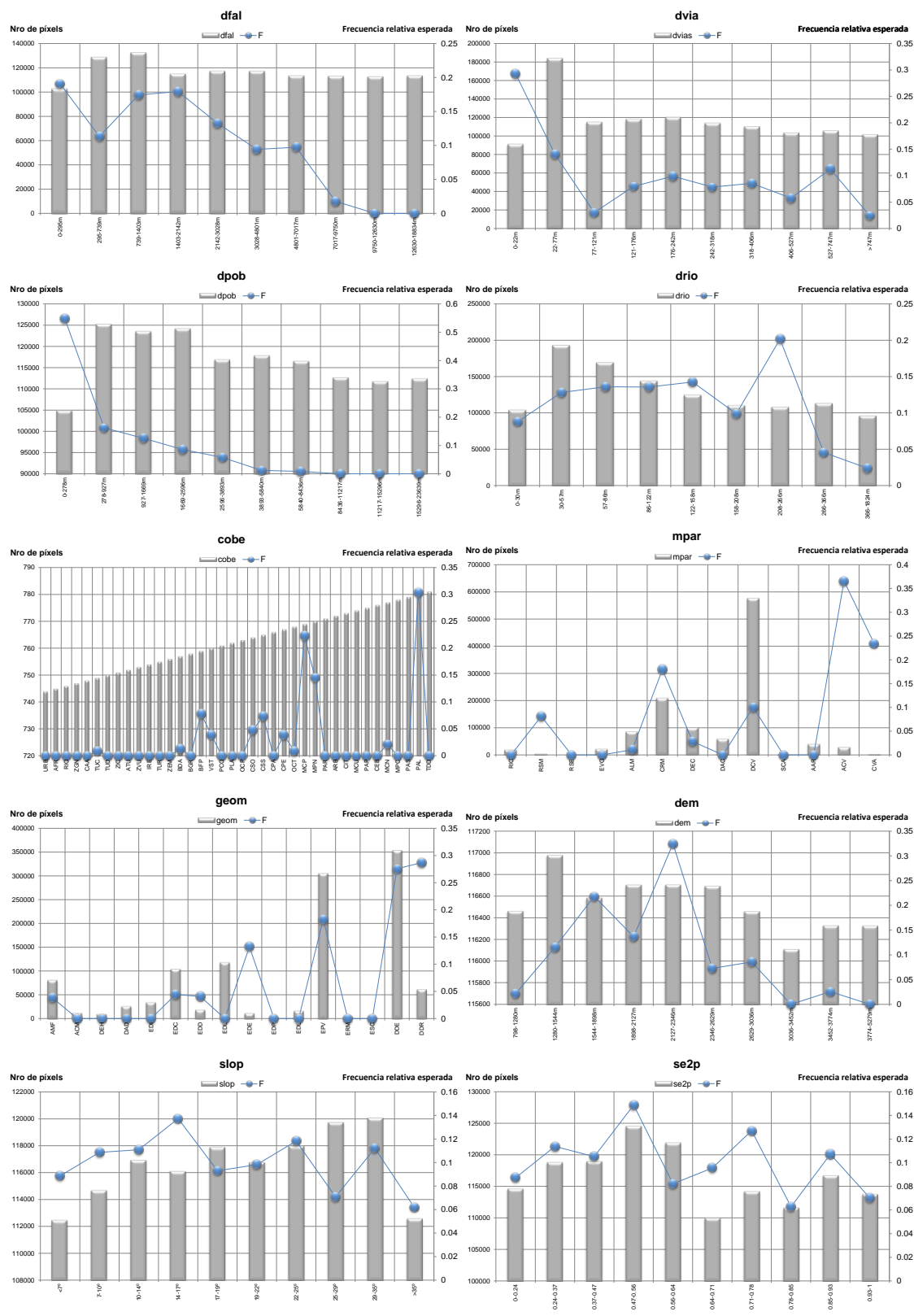


Figura 56. Modelo de relación de frecuencias MOD7

3.1.4.3. Método De Números Difusos

En la Figura 57 se presentan los valores de frecuencia relativa escalada F correspondiente a cada variable, al igual que el número de pixeles total por cada clase.



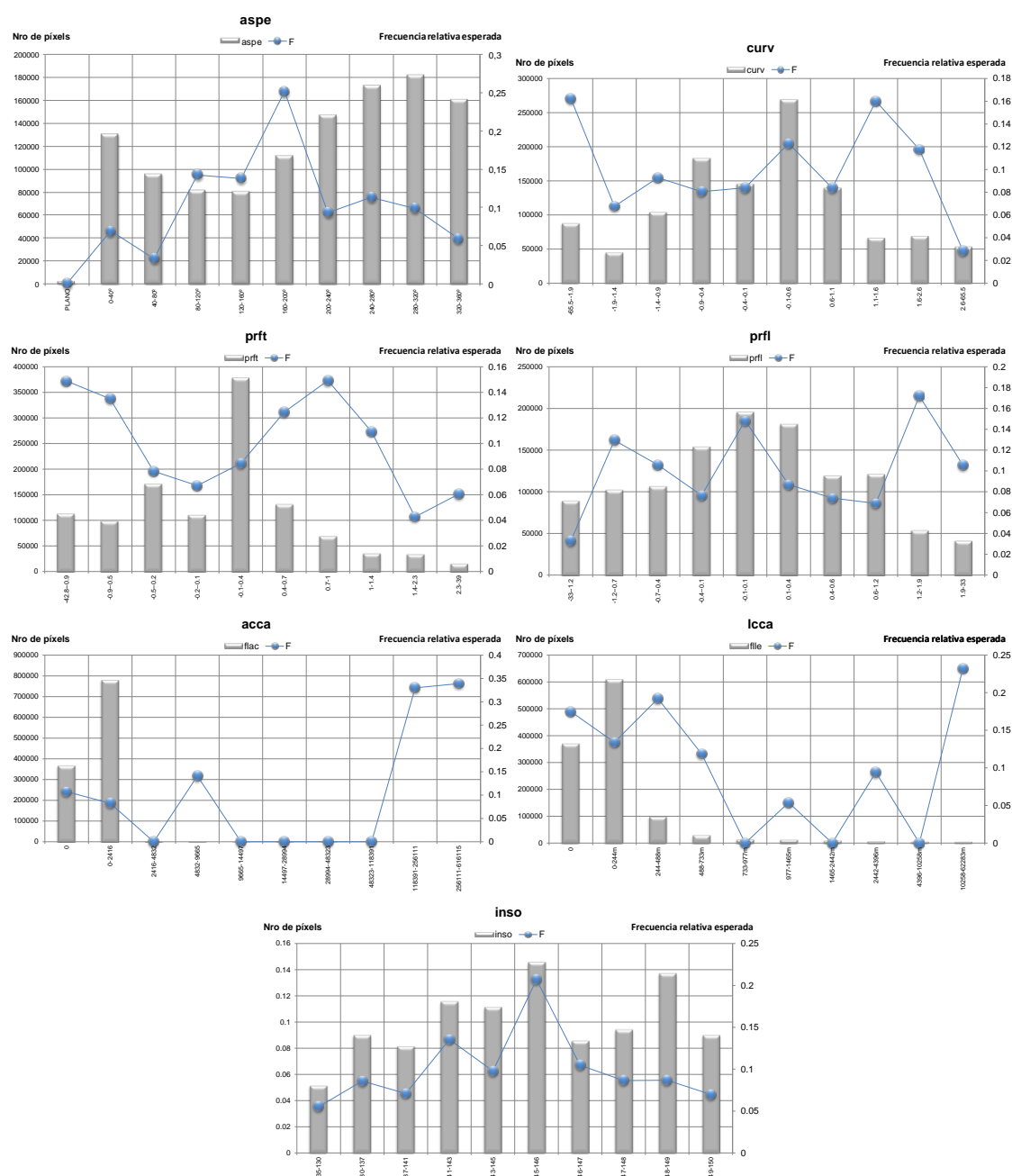


Figura 57. Frecuencia relativa escalada F correspondiente a cada variable y número de pixeles total por cada clase

Los intervalos de probabilidad obtenidos según la formulación de Goodman (Goodman 1965), permiten la construcción de números difusos trapezoidales para cada clase de cada variable. Como ejemplo se presentan en la Figura 58 los números difusos obtenidos para la variable dem.

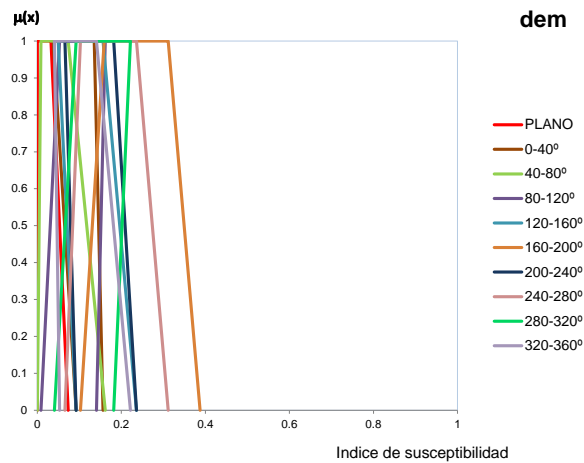
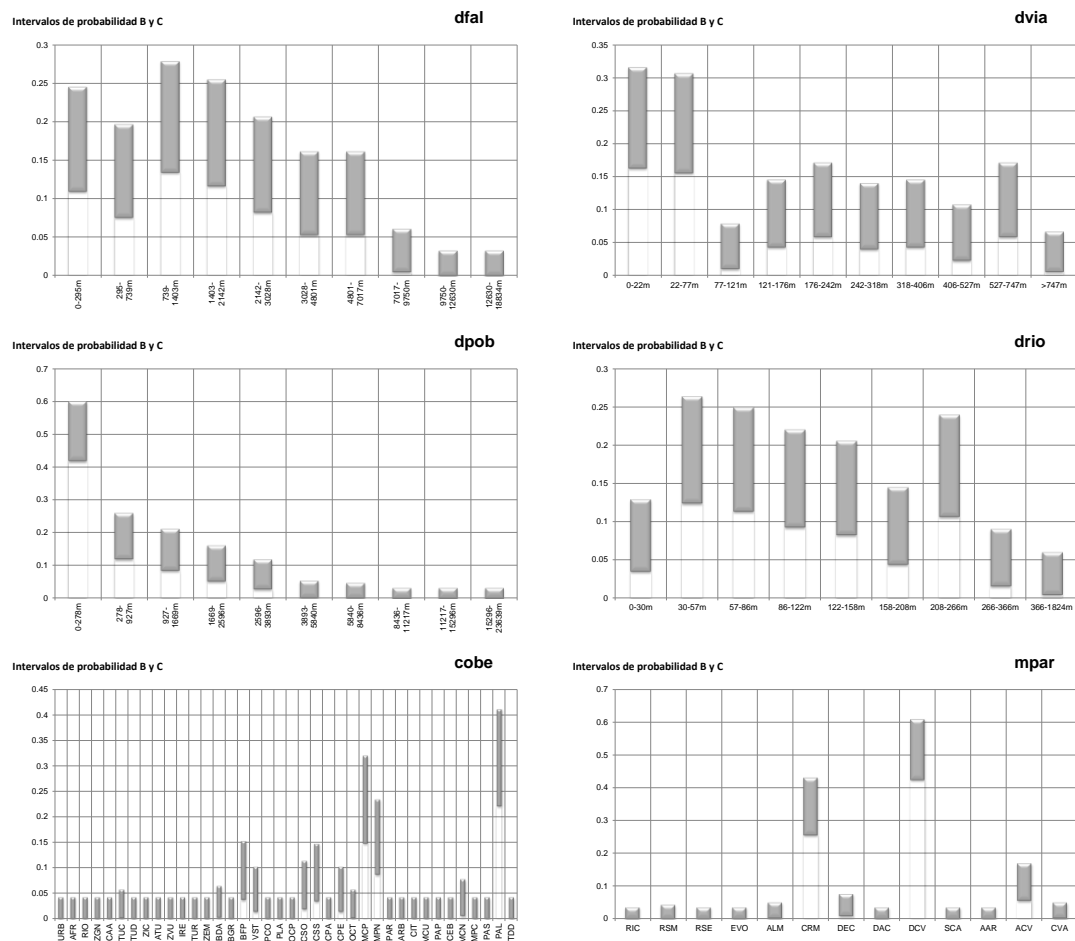
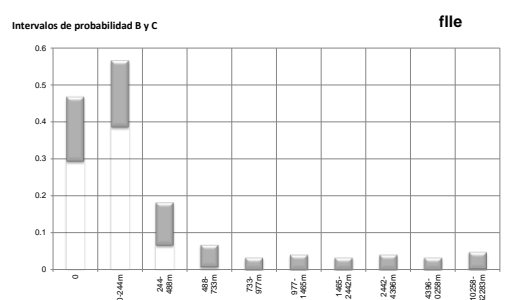
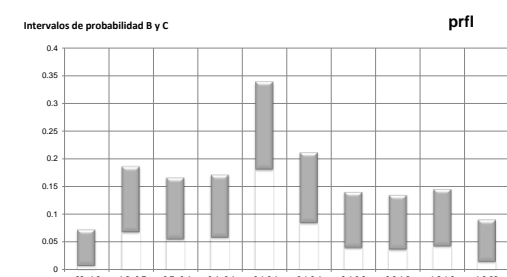
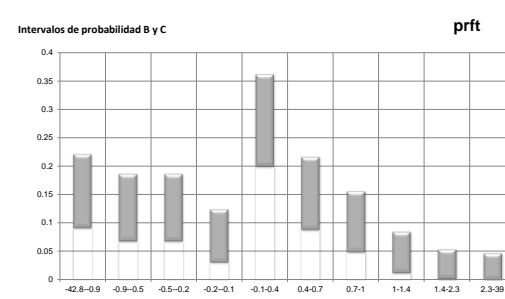
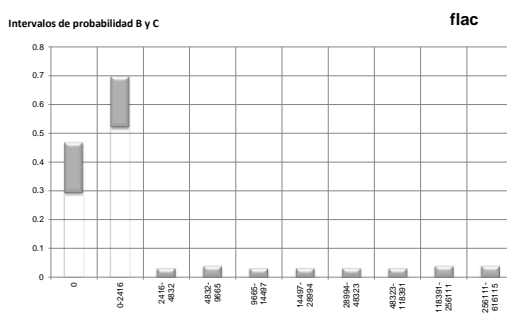
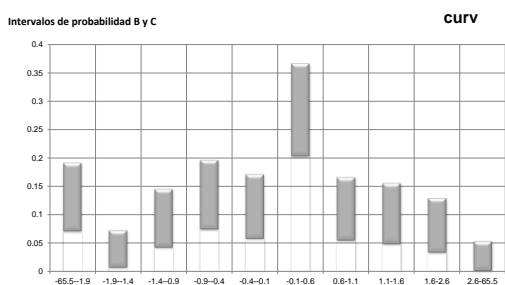
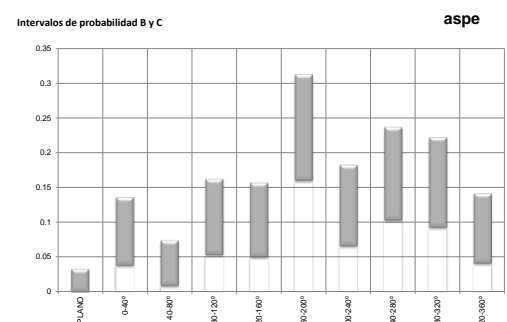
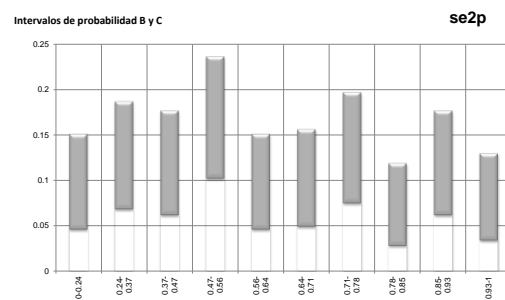
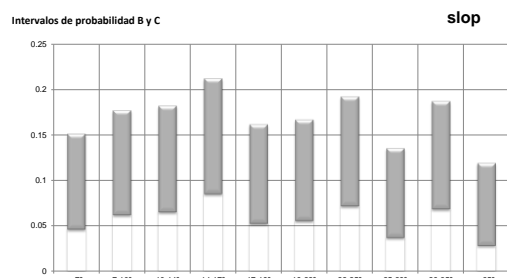
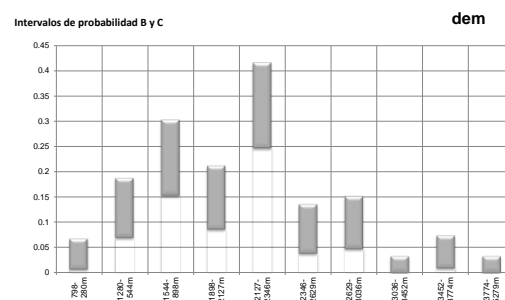
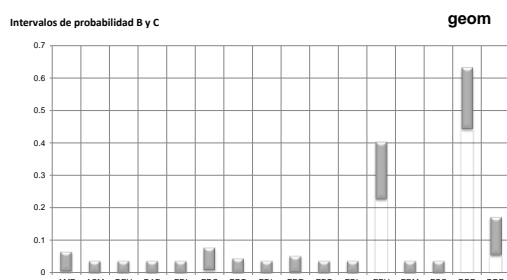


Figura 58. Ejemplo de un número difuso (variable dem)

En la Figura 59 se presentan los intervalos más creíbles, evaluados en el punto central $\alpha(x) = 1$ de los números difusos asociados a cada uno de los factores involucrados en el análisis:





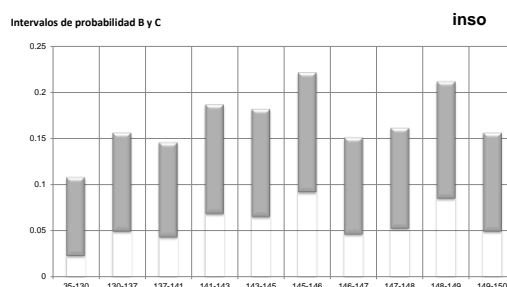


Figura 59. Intervalos de confianza evaluados en el punto central $\alpha(x)=1$ de los números difusos asociados a cada uno de los factores

Como método de agregación de los números difusos se ha optado por utilizar el operador Gamma difuso.

$$\mu_{\gamma} = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^{\gamma} * \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma}$$

Se han probado diferentes valores del exponente γ : 0.75, 0.90, 0.95, 0.975 y 0.99, para obtener mapas de susceptibilidad. Desde la Figura 61 hasta la Figura 65 se presentan los diferentes modelos obtenidos.

En cuanto a sus capacidades de clasificación, en la Figura 60 se presentan las curvas ROC obtenidas para cada modelo. Como se mencionó en la sección 2 de esta tesis, la curva es un dibujo de la probabilidad de tener un verdadero positivo (un valor correctamente predicho) versus la probabilidad de un falso positivo (un valor incorrectamente predicho). Un modelo ideal muestra un valor del área bajo la curva AUC cercano a 1, mientras un valor cercano a 0,5 evidencia un inadecuado modelo.

Los valores del área bajo la curva para el caso de celdas inestables (deslizamientos), se muestran en la la Tabla 34 bajo el nombre AUC_D; de allí se desprende que el modelo con mejor capacidad de clasificación se obtiene con un valor gamma de 0.990, con un valor AUC de 0.841, seguido muy de cerca por los otros dos modelos. En cuanto a clasificación de celdas estables, los valores AUC_E se encuentran cercanos a 0.5 en los tres casos, siendo deseables valores tendientes a cero y el mejor resultado se obtiene con un valor gamma de 0.900. Sin embargo, para efectos de elección de un modelo de susceptibilidad a deslizamientos, es preferible aquel que acierte en clasificar correctamente celdas inestables que estables.

Tabla 34. Parámetros de rendimiento modelos de conjuntos difusos

	G0750	G0900	G0950	G0975	G0990
AUC_D	0,841	0,840	0,839	0,841	0,831
AUC_E	0,482	0,481	0,481	0,482	0,480
fn	19	19	20	19	23
tp	215	215	214	215	211
tn	122	121	120	122	119
fp	112	113	114	112	115
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,720	0,718	0,714	0,720	0,705
SENSIBILIDAD	0,919	0,919	0,915	0,919	0,902
ESPECIFICIDAD	0,479	0,483	0,487	0,479	0,491
GILBERT SCORE	0,621	0,620	0,615	0,621	0,605
PEIRCE SKILL SCORE	-0,426	-0,430	-0,437	-0,426	-0,448
HEIDKE SKILL SCORE	0,440	0,436	0,427	0,440	0,410
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,850	0,848	0,837	0,850	0,809

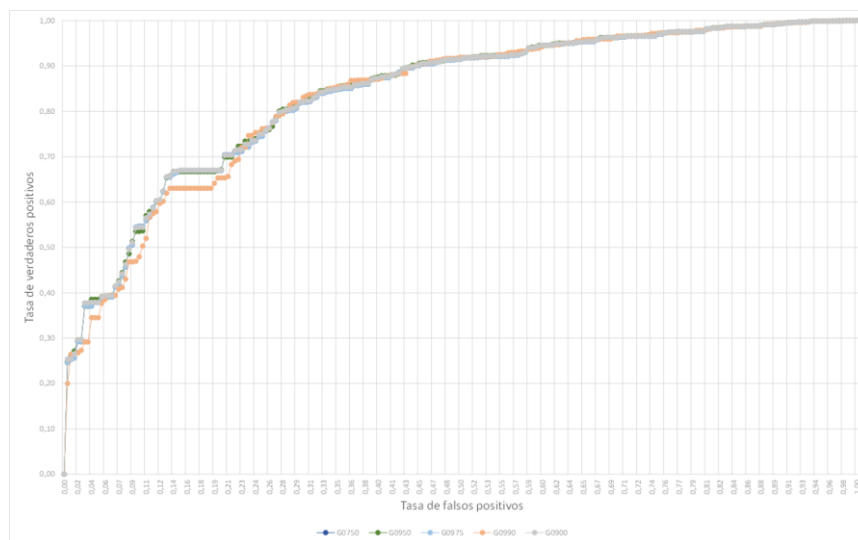


Figura 60. Curvas de rendimiento modelos de conjuntos difusos

3.1.4.3.1. Modelo $\gamma: 0.75$

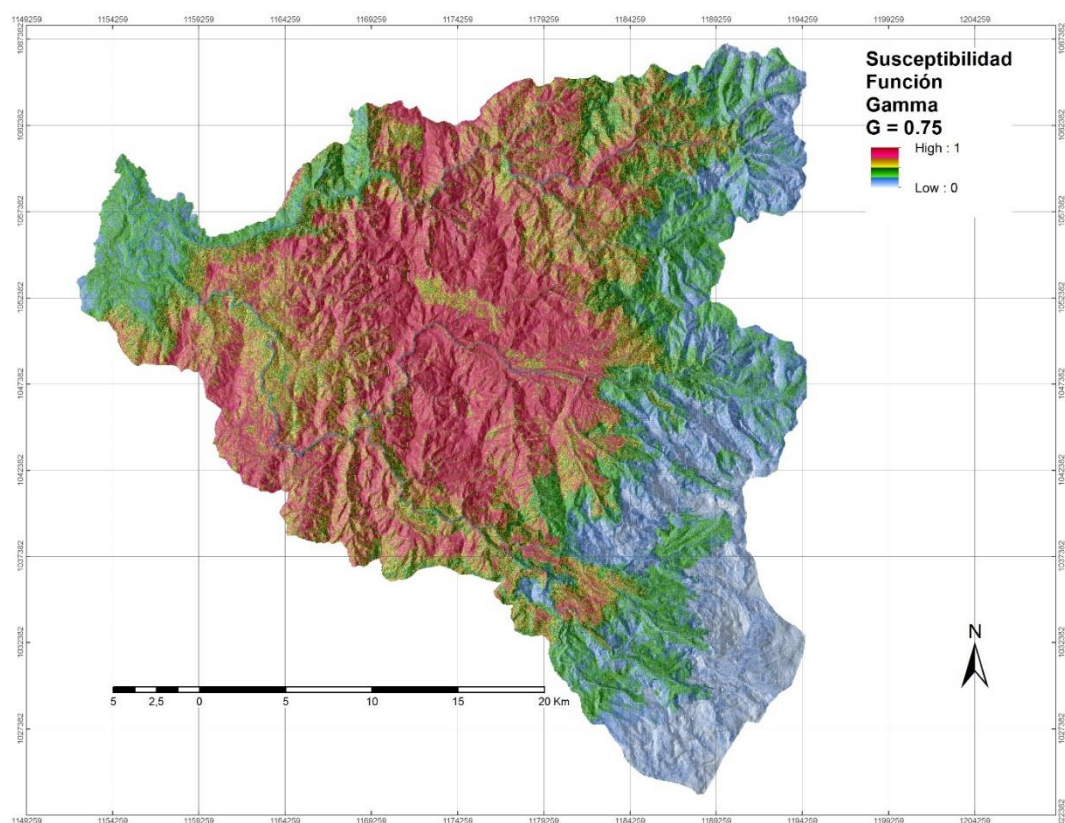


Figura 61. Susceptibilidad modelo de conjuntos difusos $\gamma: 0.75$

3.1.4.3.2. Modelo $\gamma: 0.90$

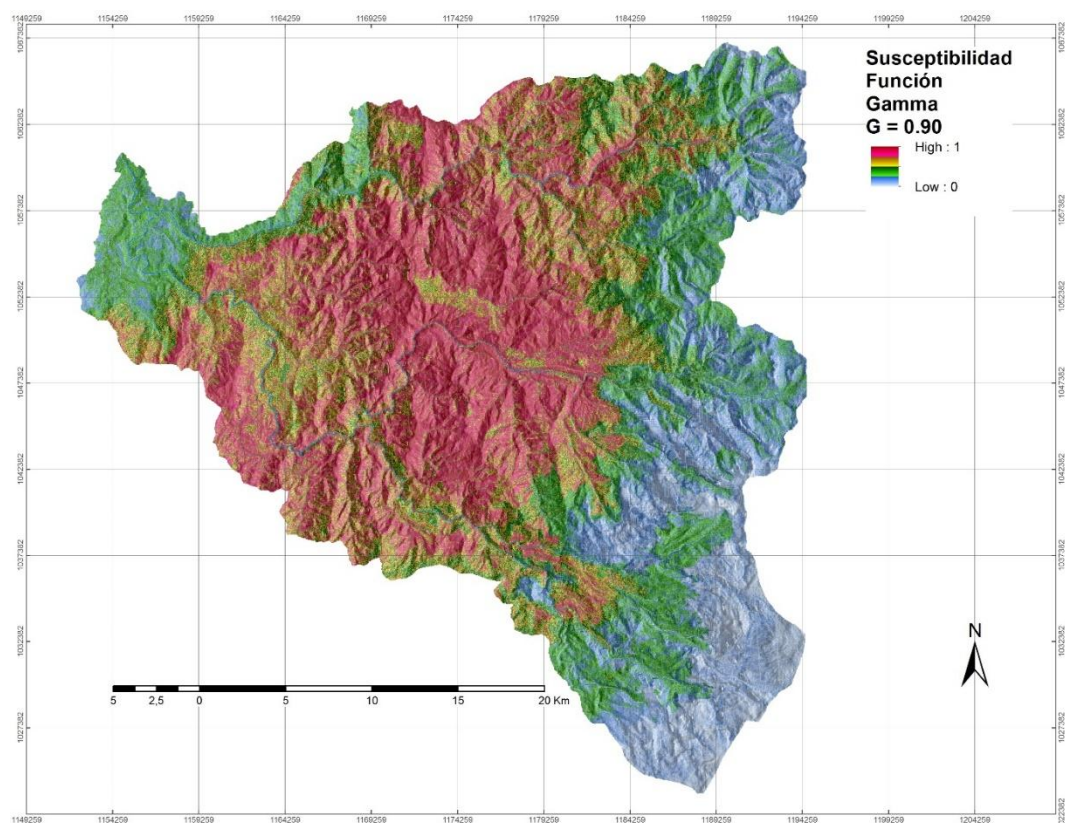


Figura 62. Susceptibilidad modelo de conjuntos difusos $\gamma: 0.90$

3.1.4.3.3. Modelo $\gamma: 0.95$

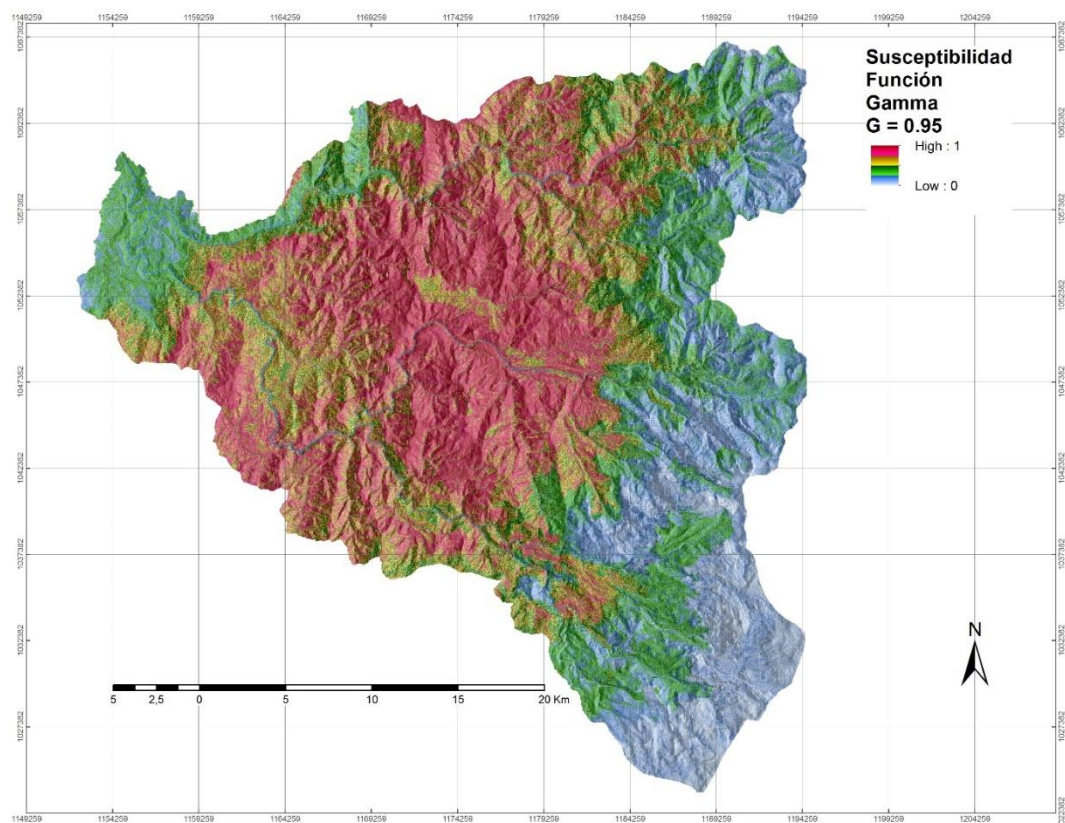


Figura 63. Susceptibilidad modelo de conjuntos difusos $\gamma: 0.95$

3.1.4.3.4. Modelo $\gamma: 0.975$

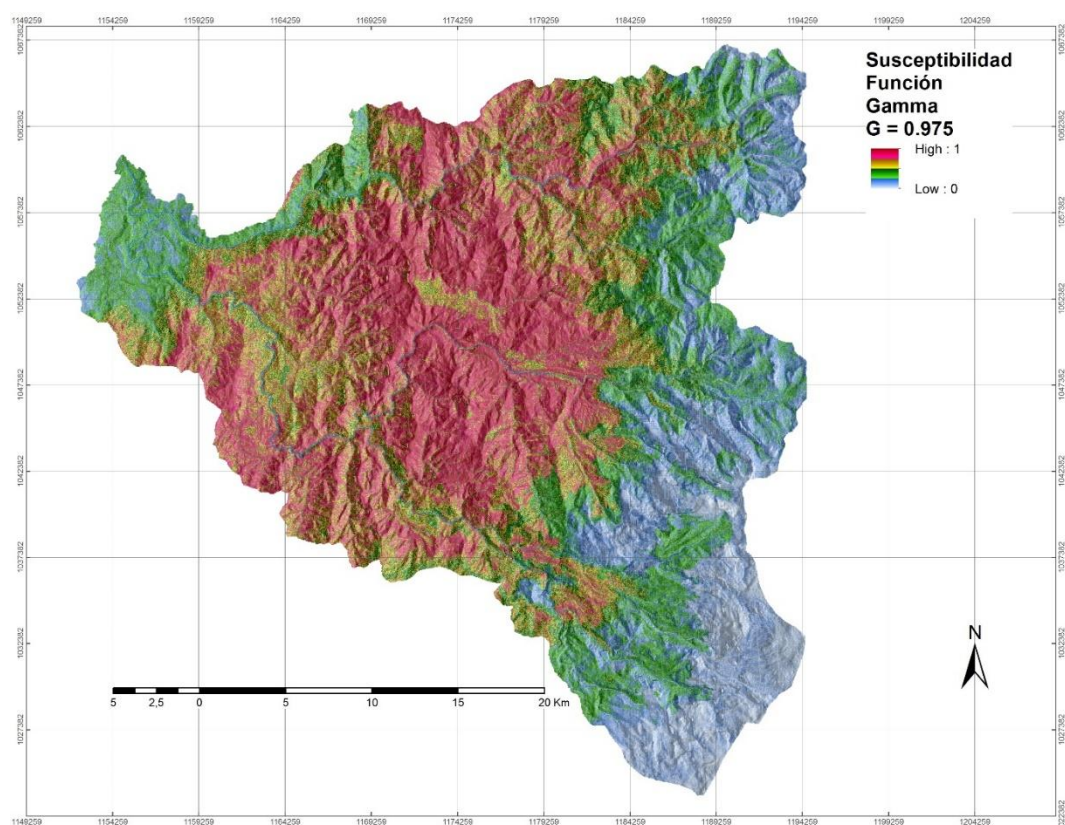


Figura 64. Susceptibilidad modelo de conjuntos difusos $\gamma: 0.975$

3.1.4.3.5. Modelo $\gamma: 0.99$

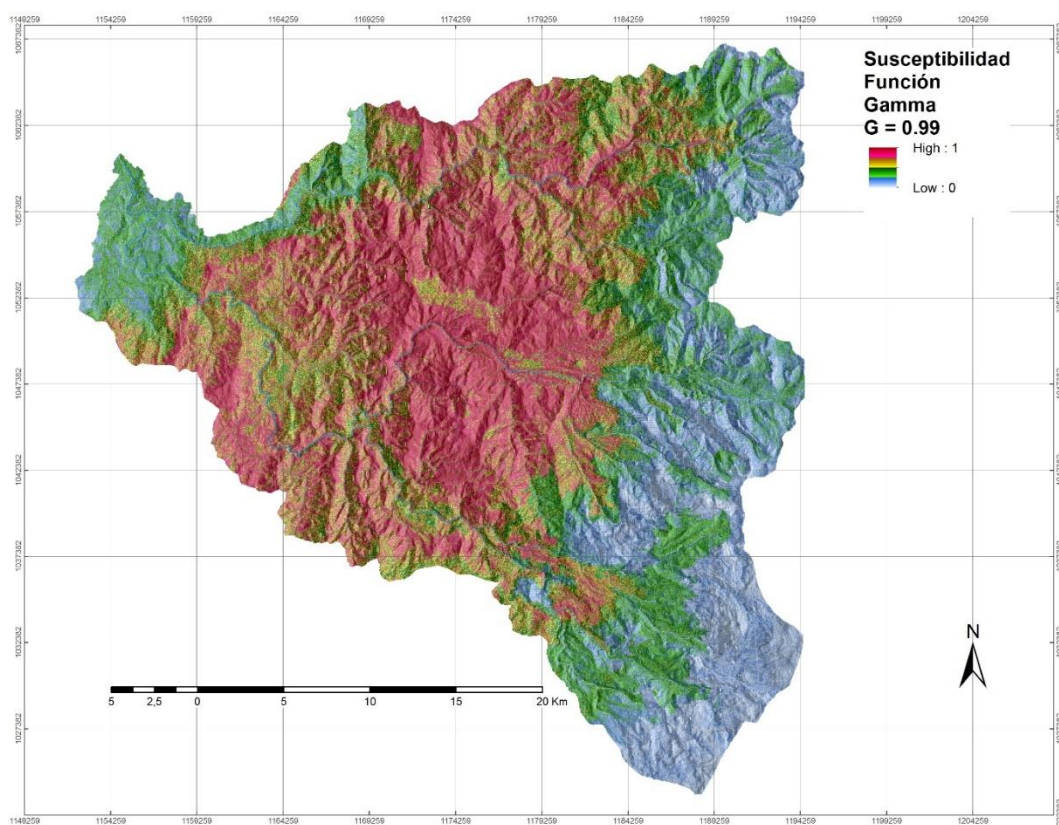


Figura 65. Susceptibilidad modelo de conjuntos difusos $\gamma: 0.99$

3.1.4.4. Método de Redes Neuronales Artificiales

En casos de insuficiencia de datos, el modelo obtenido puede presentar sensibilidad a la distribución de los grupos de datos mencionados. Para prevenir esta situación se han evaluado cinco modelos diferentes, cambiando la asignación de grupos como se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35. Distribución de datos en grupos para configurar cinco modelos de RNA

	RNA01	RNA02	RNA03	RNA04	RNA05
20%	Entrenamiento	Test	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento
20%	Entrenamiento	Entrenamiento	Test	Validación	Entrenamiento
20%	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento	Test	Validación
20%	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento	Test
20%	Test	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento

El nivel de rendimiento de cada modelo se evalúa de acuerdo a su particular capacidad de clasificación. La clasificación correcta de un deslizamiento en una zona de alta susceptibilidad (verdadero positivo) se conoce como sensibilidad; la clasificación correcta de un punto no susceptible como susceptibilidad baja es denominada especificidad (verdadero negativo); y el total de píxeles correctamente clasificados se conoce como precisión.

En cuanto a sus capacidades de clasificación, en la Figura 66 se presentan las curvas ROC obtenidas para cada modelo. Como se mencionó en la sección 2 de esta tesis, la curva es un dibujo de la probabilidad de tener un verdadero positivo (un valor correctamente predicho) versus la probabilidad de un falso positivo (un valor incorrectamente predicho). Un modelo ideal muestra un

valor del área bajo la curva AUC cercano a 1, mientras un valor cercano a 0,5 evidencia un inadecuado modelo.

Los valores del área bajo la curva para el caso de celdas inestables (deslizamientos), se muestran en la Tabla 36 bajo el nombre AUC_D; de allí se desprende que el modelo medio obtenido mediante la combinación de los 5 modelos de redes neuronales, presenta un valor AUC de 0.843. En cuanto a clasificación de celdas estables, los valores AUC_E están por debajo de 0.5 en todos los casos.

Tabla 36. Parámetros de rendimiento modelos de redes neuronales

	ANmean	AN05	AN04	AN03	AN02	AN01
AUC_D	0,843	0,890	0,879	0,879	0,837	0,846
AUC_E	0,221	0,236	0,219	0,478	0,200	0,231
fn	12	10	11	3	16	18
tp	222	224	223	231	218	216
tn	181	174	180	123	183	183
fp	53	60	54	111	51	51
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,861	0,850	0,861	0,756	0,857	0,853
SENSIBILIDAD	0,949	0,957	0,953	0,987	0,932	0,923
ESPECIFICIDAD	0,226	0,256	0,231	0,474	0,218	0,218
GILBERT SCORE	0,774	0,762	0,774	0,670	0,765	0,758
PEIRCE SKILL SCORE	-0,143	-0,156	-0,140	-0,141	-0,155	-0,162
HEIDKE SKILL SCORE	0,722	0,701	0,722	0,513	0,714	0,705
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,969	0,970	0,971	0,977	0,960	0,955

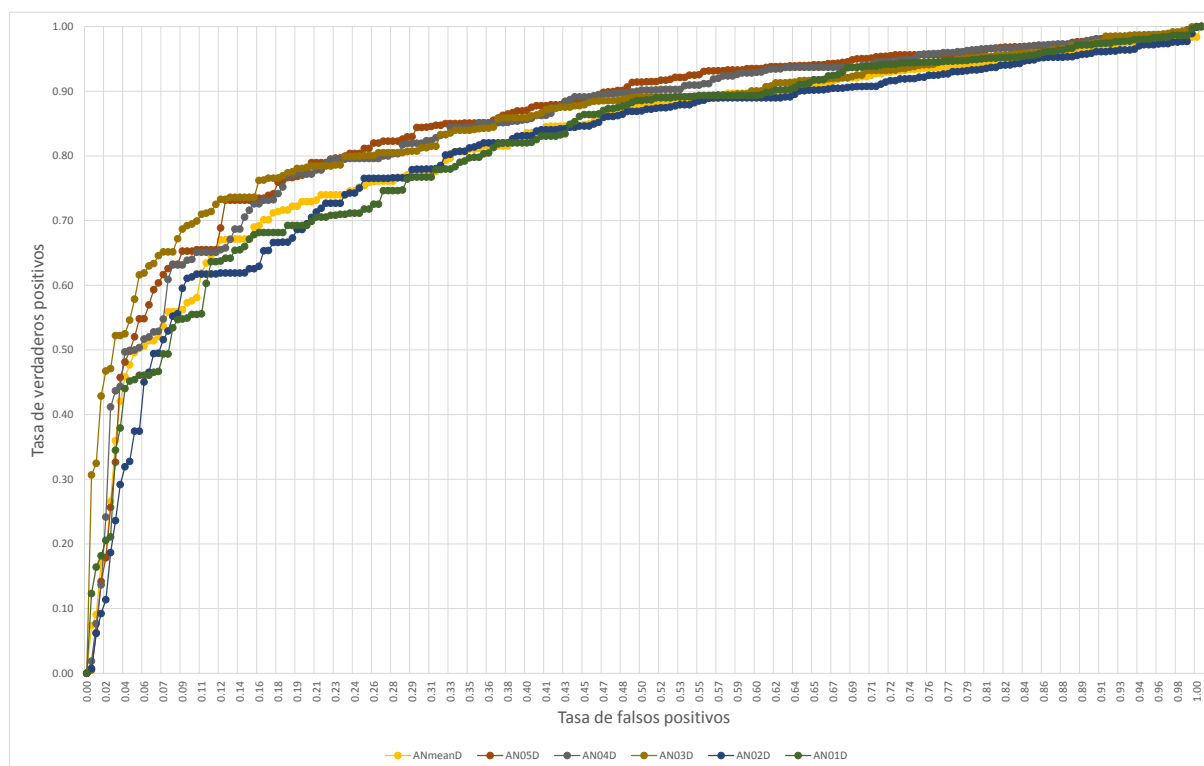


Figura 66. Curvas de rendimiento modelos de conjuntos difusos

3.1.4.4.1. RNA1

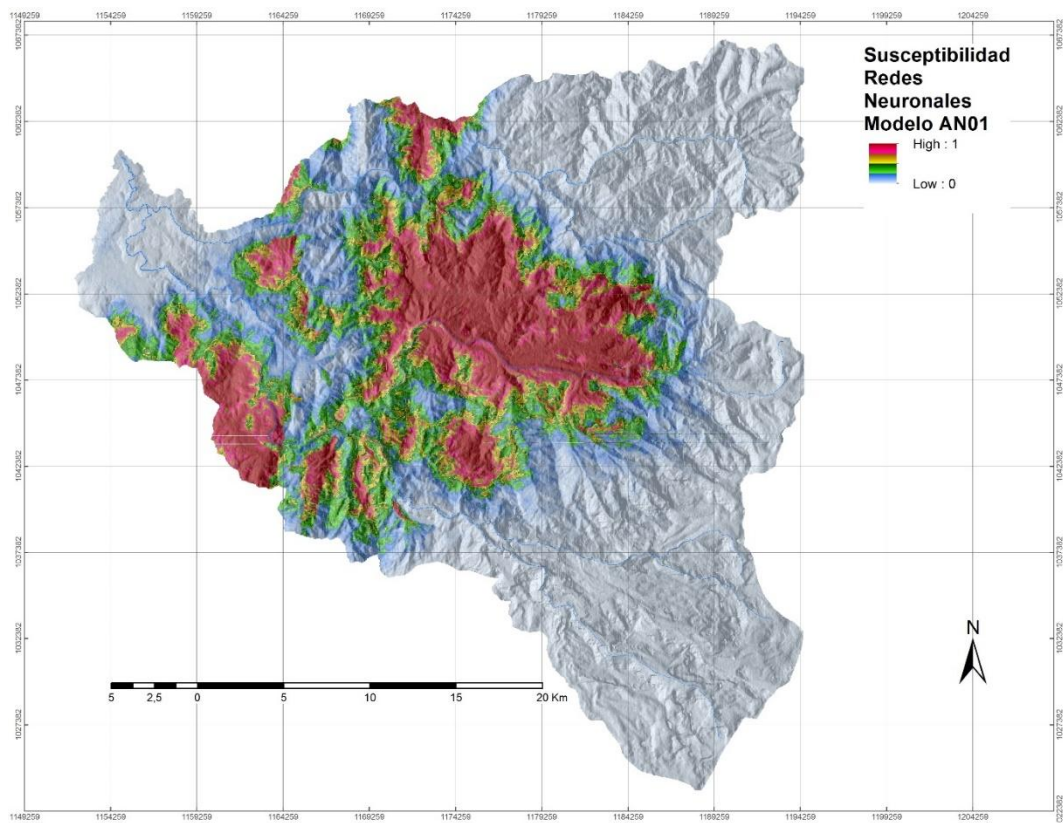


Figura 67. Modelo RNA01

3.1.4.4.2. RNA 2

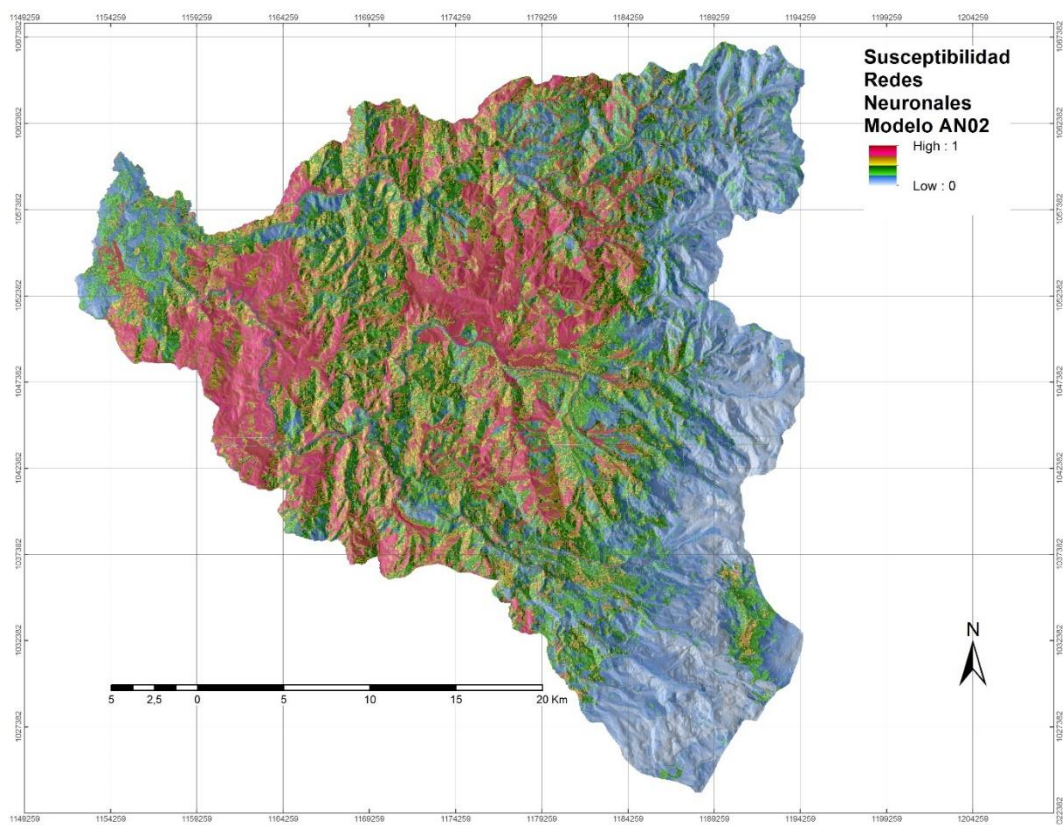


Figura 68. Modelo RNA02

3.1.4.4.3. RNA3

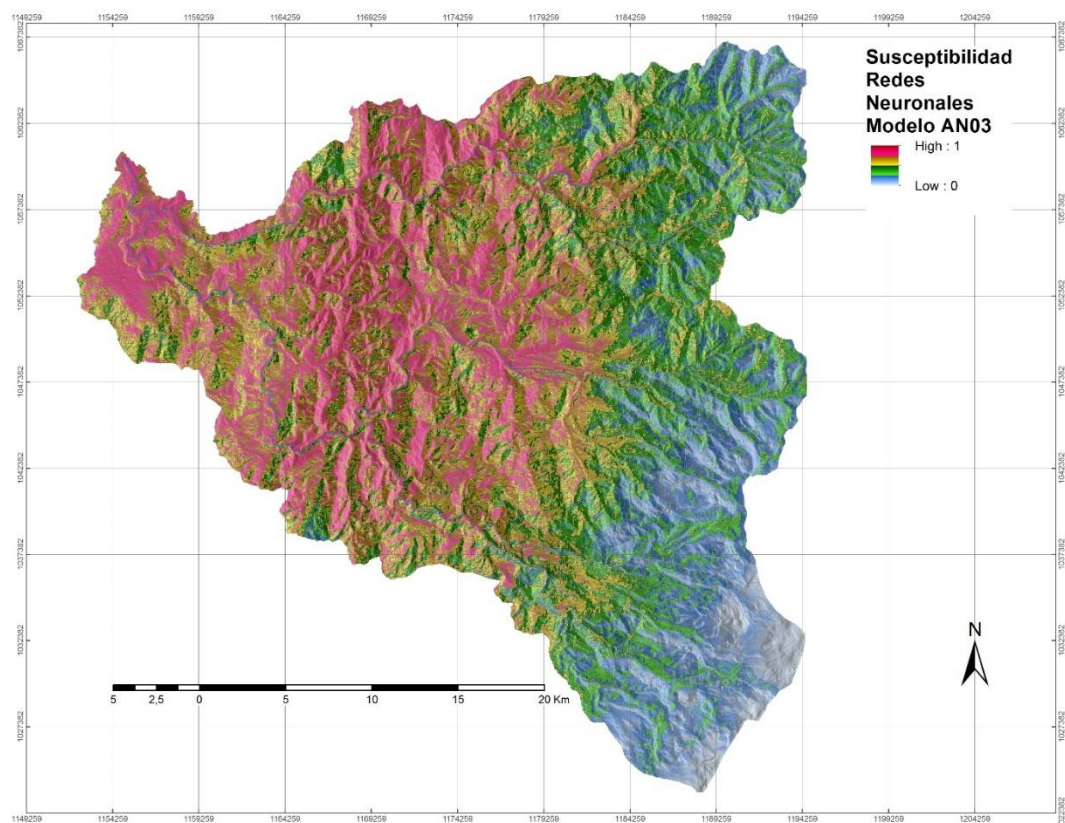


Figura 69. Modelo RNA03

3.1.4.4.4. RNA4

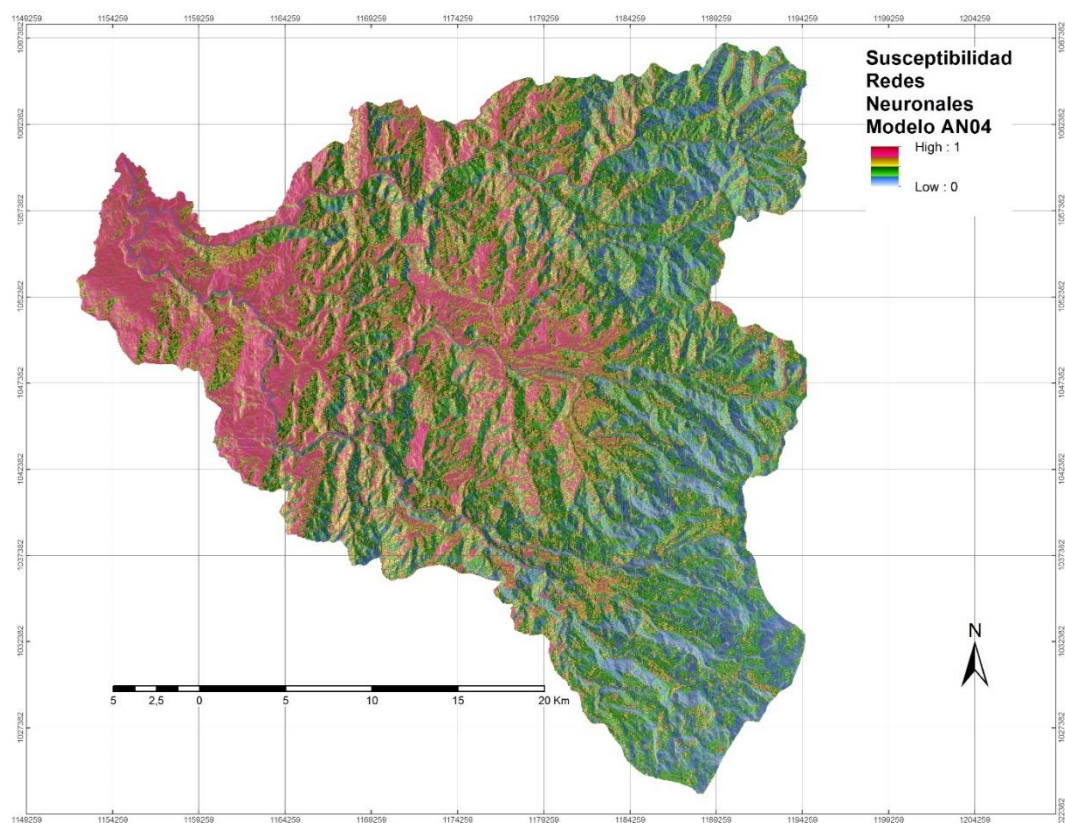


Figura 70. Modelo RNA04

3.1.4.4.5. RNA5

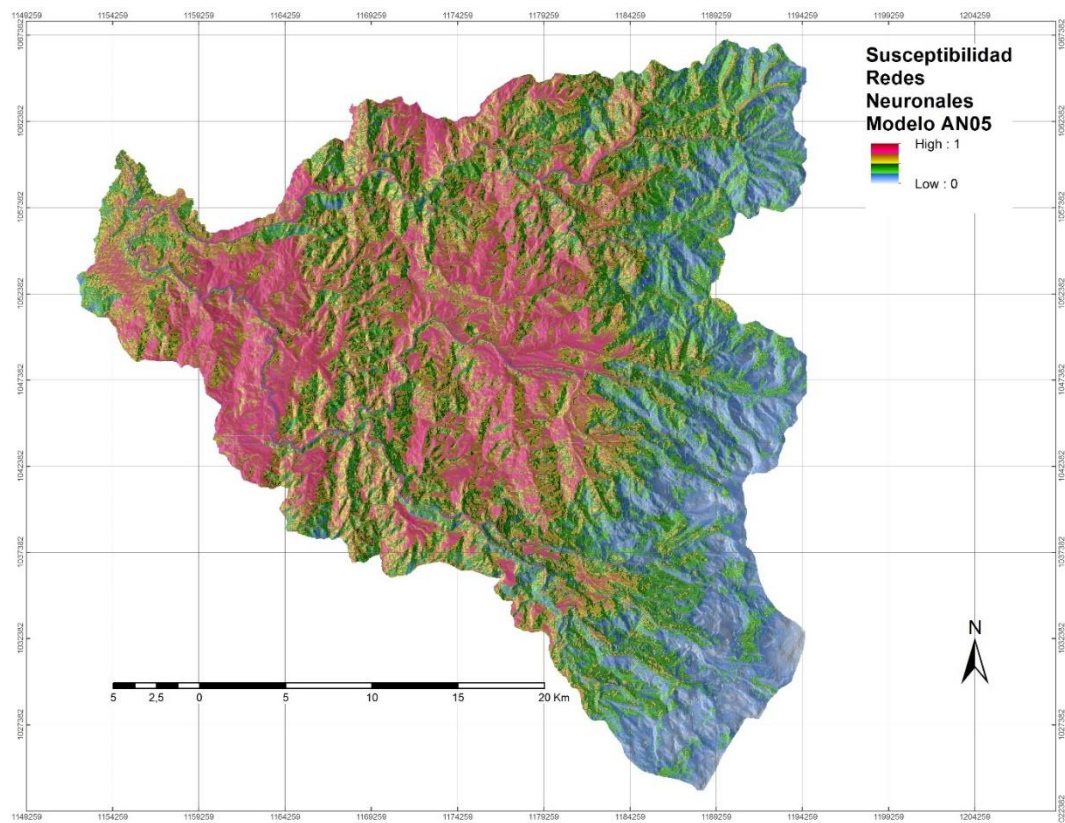


Figura 71. Modelo RNA05

3.1.4.4.6. Media y Desviación Estándar

El mapa final de susceptibilidad, calculado como la media de los cinco modelos se presenta en la Figura 72, y su correspondiente desviación estándar en la Figura 73.

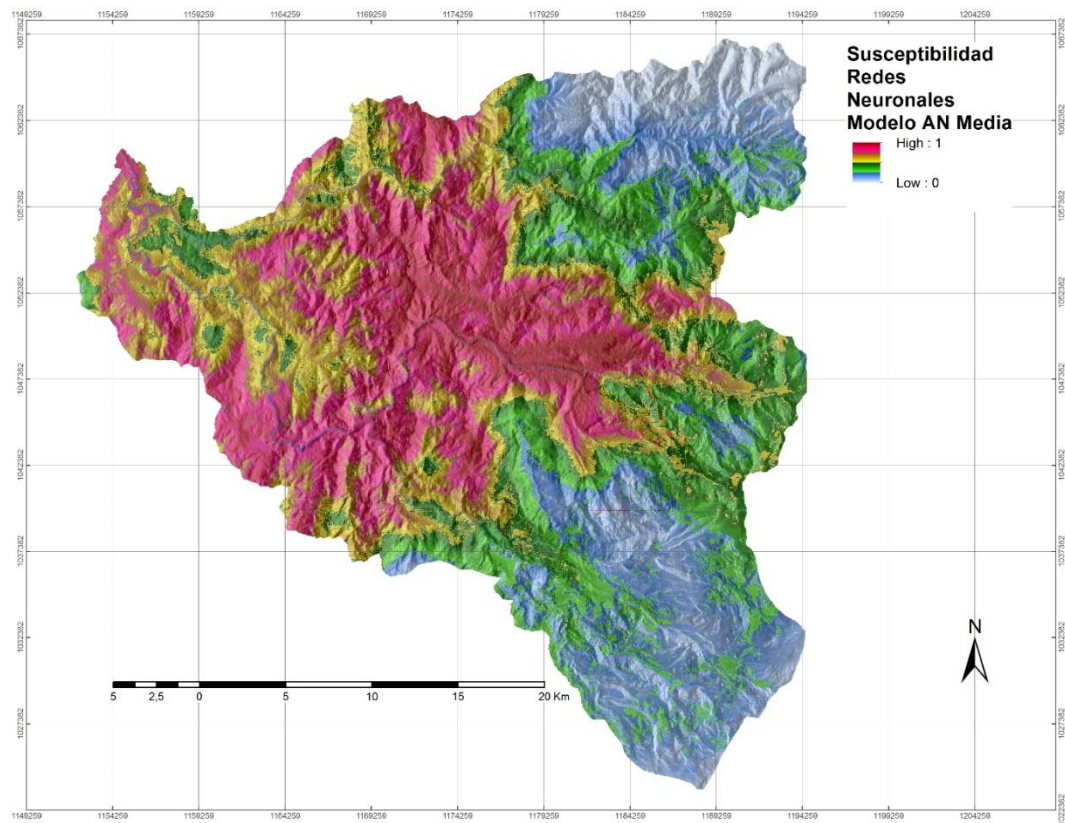


Figura 72. Modelo RNA promedio

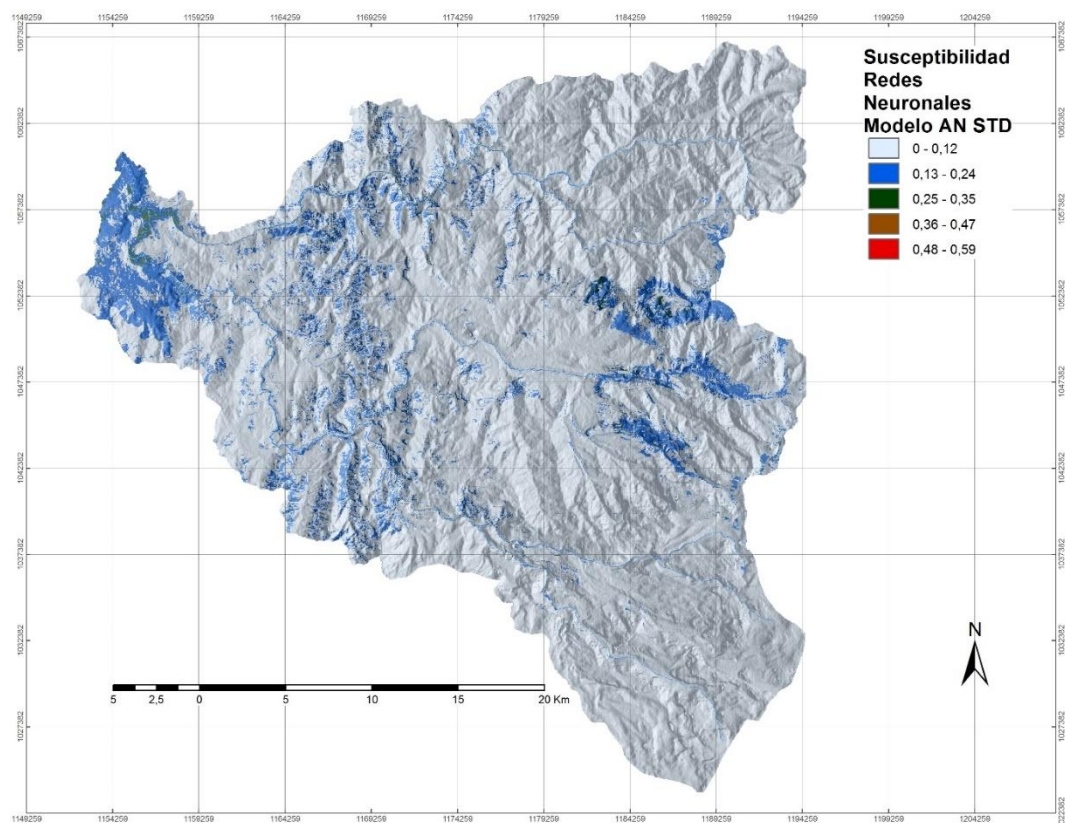


Figura 73. Desviación estándar modelo RNA promedio

3.1.4.5. Pruebas de rendimiento

La Figura 74 presenta un diagrama resumen del rendimiento de los diferentes modelos propuestos para evaluar la susceptibilidad de la cuenca del río Chinchiná. Las redes neuronales y los modelos de análisis discriminante ofrecen mejores resultados.

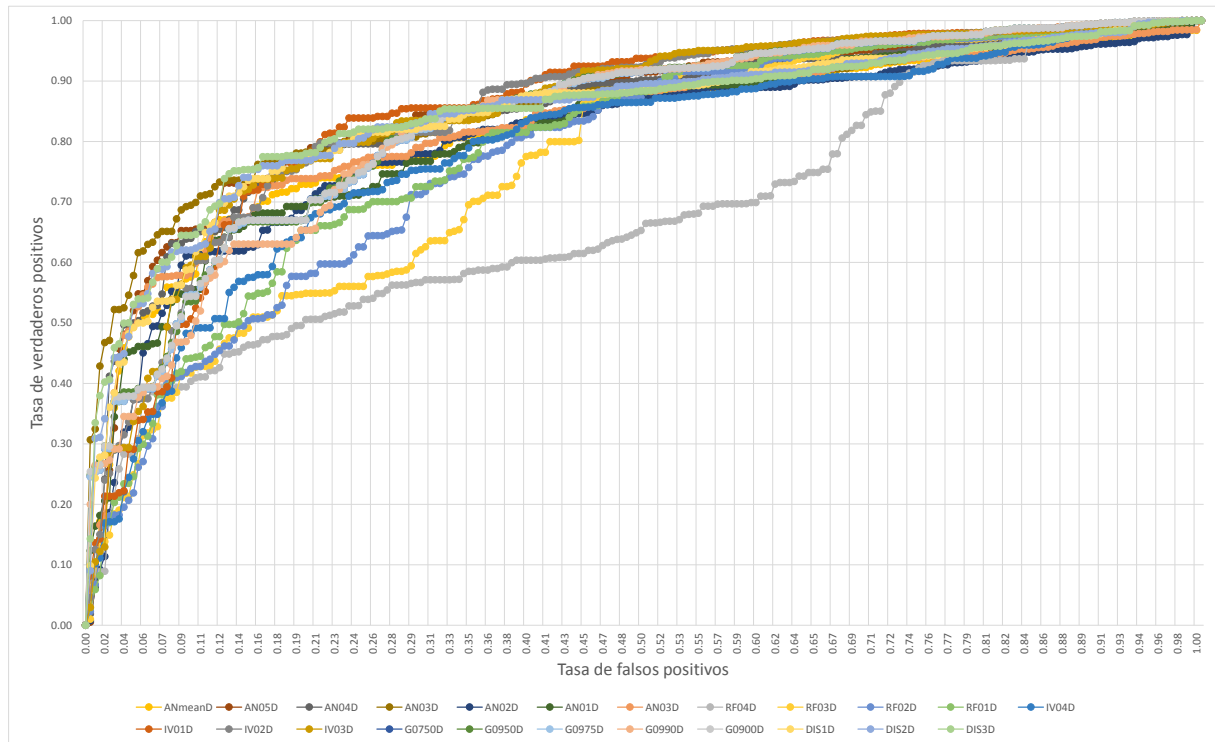


Figura 74. Rendimiento general de todos los modelos de susceptibilidad evaluados

Como puede observarse, los modelos que ofrecen mejor rendimiento en cuanto a correcta clasificación de eventos previos de deslizamientos son los obtenidos por el análisis discriminante: aproximadamente el 90% de deslizamientos corresponde al nivel de susceptibilidad más alto, superior a 0.8/1.0; en segundo lugar el modelo obtenido mediante la RNA; a continuación los modelos obtenidos mediante los conjuntos difusos, y por último los calculados mediante relación de frecuencias.

3.2. Zona urbana de la ciudad de Manizales

3.2.1. Inventario de deslizamientos

Partiendo del inventario de eventos previos presentado en la Figura 75 y aceptando que éstos reflejan la condición de máxima susceptibilidad, dado que son susceptibilidad materializada en deslizamientos, se cuenta con 327 puntos correspondientes a un valor máximo (1), extractados después de un filtrado que descartó eventos en zonas planas y datos duplicados.

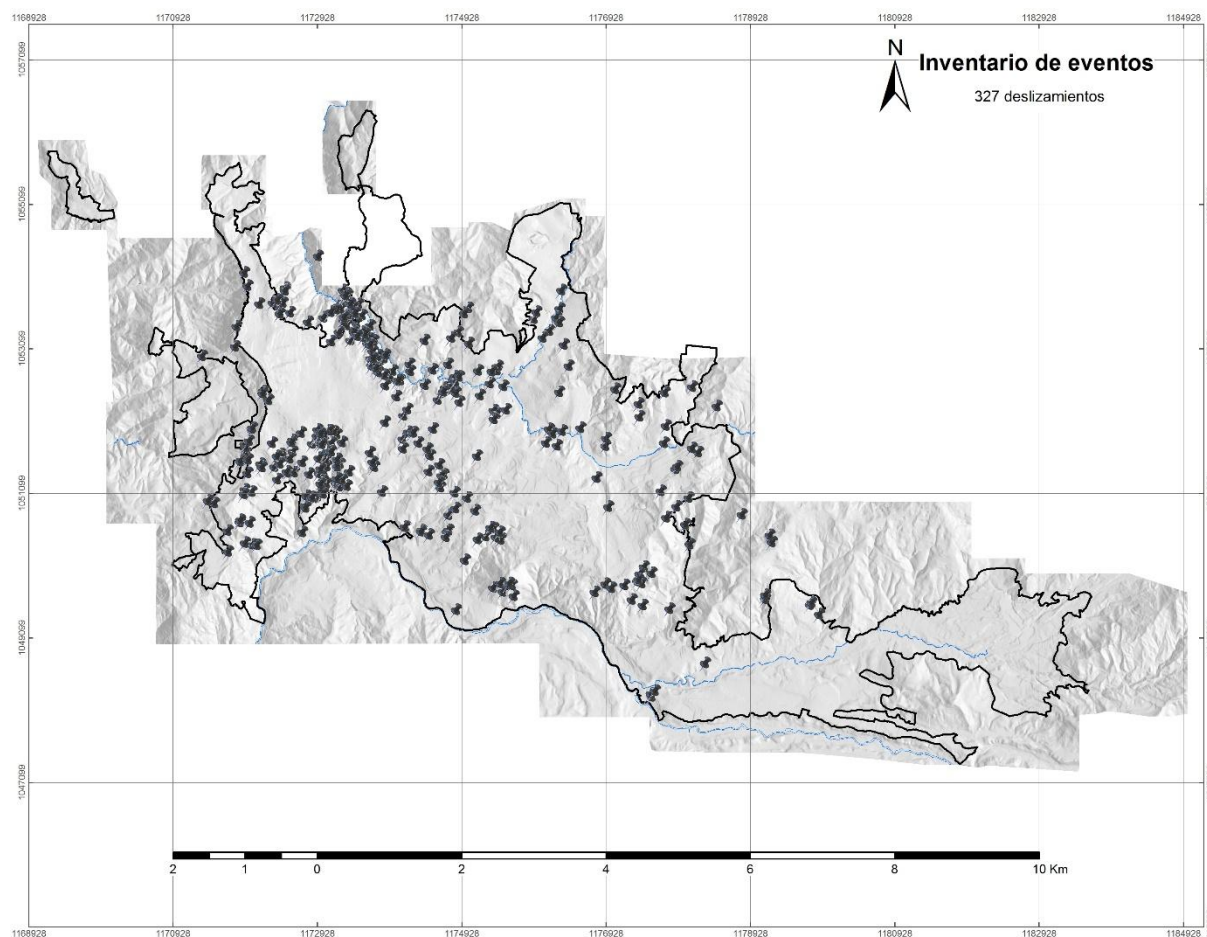


Figura 75. Inventario de eventos previos

3.2.2. Factores de propensividad

En el presente estudio, dada la disponibilidad de datos, se han seleccionado 24 variables como datos de entrada como puede observarse en la Tabla 37. En cada caso se obtiene un mapa en formato ráster con una resolución de píxel de 5mx5m que servirá de insumo para los cálculos de susceptibilidad a deslizamientos que se plantean en los siguientes capítulos.

Tabla 37. Factores de propensividad a la inestabilidad de laderas en la ciudad de Manizales

		Factor Causal	Tipo	Descripción
1	geol	Geología	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de geología del área urbana
2	geom	Geomorfología	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de procesos geomorfológicos en el área urbana

		Factor Causal	Tipo	Descripción
3	fms	Formaciones Superficiales	Suelos/Geología	Mapa de formaciones superficiales en la ciudad
4	cobe	Mapa de cobertura	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de cobertura del terreno
5	dem	Modelo digital de elevaciones	Derivados de la topografía	Elevación del terreno en metros sobre el nivel del mar
6	pend	Pendiente	Derivados de la topografía	Pendiente de cada píxel de terreno en grados
7	se2p	Pendiente transformada	Derivados de la topografía	Se trata de una transformación senoidal de la pendiente $se2p = \sin(2 \times pend)$. El supuesto es que para taludes, se llega a un "ángulo límite" a partir del cual, si hay estabilidad, se considera que el material es suficientemente resistente y por lo tanto la propensión a deslizarse empieza a reducirse
8	aspe	Orientación de las laderas	Derivados de la topografía	Orientación de cada celda del terreno respecto al norte geográfico
9	seas	Seno de la orientación	Derivados de la topografía	Seno de la orientación de laderas (se utiliza para identificar laderas orientadas en sentido norte-sur)
10	coas	Coseno de la orientación	Derivados de la topografía	Seno de la orientación de laderas (se utiliza para identificar laderas orientadas en sentido oriente-occidente)
11	curv	Curvatura de la superficie	Derivados de la topografía	Curvatura de la superficie. Un valor positivo indica que la superficie es convexa, mientras que uno negativo indica que es cóncava
12	crpl	Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente	Derivados de la topografía	Curvatura (en un plano) perpendicular al sentido de la pendiente de cada píxel
13	crpr	Curvatura en el sentido de la pendiente	Derivados de la topografía	Es la curvatura del perfil longitudinal del terreno en cada píxel
14	acca	Área de cuenca vertiente	Derivados de la topografía	Para un píxel dado, es la sumatoria de todos los píxeles cuyas aguas drenan hacia él. (similar al concepto de área aferente)
15	lcca	Longitud de flujo	Derivados de la topografía	Para un píxel dado, es la distancia máxima que podría recorrer una gota de agua que drenara hacia él
16	inso	Insolación incidente en el terreno	Derivados de la topografía	Es el promedio de los mapas de insolación para cada hora del día; se calcula según la posición del sol y varía de 0 o nula insolación hasta 255 o máxima insolación
17	ruco	Rugosidad	Derivados de la topografía	Rugosidad del área urbana
18	dfal	Distancia a fallas y lineamientos	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la falla geológica más cercana
19	dvía	Distancia a vías y carreteras	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la vía más cercana
20	ddre	Distancia a drenajes	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el cauce o drenaje más cercano
21	dacu	Distancia a la red de acueducto	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el elemento de la red de acueducto más cercano
22	dalc	Distancia a la red de alcantarillado	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el elemento de la red de alcantarillado más cercano
23	drio	Distancia a ríos	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el río más cercano
24	dvne	Densidad de viviendas	Socio-demográficos	Densidad de viviendas en unidades de vivienda por hectárea
25	dpbr	Densidad poblacional bruta	Socio-demográficos	Densidad de habitantes por hectárea bruta de cada barrio
26	dpne	Densidad poblacional neta	Socio-demográficos	Densidad de habitantes por hectárea neta construida de cada barrio
27	v50m	Viviendas en un radio de 50 m	Socio-demográficos	Número de viviendas en un radio de 50 metros en torno a cada píxel del terreno
28	h50m	Habitantes en un radio de 50 metros	Socio-demográficos	Número de habitantes en un radio de 50 metros en torno a cada píxel del terreno
29	estr	Estrato socioeconómico	Socio-demográficos	Estratificación socioeconómica disponible para cada punto del terreno

3.2.2.1. Suelos / Geología

3.2.2.1.1. Geología

En los mapas de geología de la ciudad de Manizales es posible encontrar la zonificación por materiales en trece categorías diferentes. A partir de esta zonificación, se asigna un peso a cada sector, dependiendo de la resistencia o susceptibilidad que presenten al proceso de deslizamiento. Estos criterios geológicos se aplican según las propiedades del material, sin tener en cuenta la situación espacial en el terreno ni la localización en zonas de fuerte o débil pendiente; tampoco se considera el grado de meteorización que posean, pues para incluir esta condición en el análisis, sería necesario hacer un estudio geológico exhaustivo a un nivel de detalle que escapa al alcance del presente trabajo y su inclusión solamente matizaría un poco las clasificaciones propuestas, es decir, se incluirían subdivisiones dentro de la clasificación.

La Tabla 38 muestra la clasificación propuesta en el presente estudio con los pesos asignados según las propiedades de cada zona.

Tabla 38. . Asignación de peso a sectores geológicos de Manizales

Código	Nombre	Peso asignado
Lle	Llenos y/o explanaciones	100
Qcp	Depósitos de caída piroclástica	70
Qcv	Depósitos coluviales	80
Qdsc	Depósitos Sancancio	60
Qfe	Flujos de escombros	60
Qfl	Flujos de lodos	60
Qam	Depósitos fluviovolcánicos Enea	60
Qal	Depósitos aluviales	60
Tscb	Formación Casabianca	50
Tsmz	Formación Manizales	50
Kqd	Formación Quebradagrande	30
Kgb	Gabros Olivares	10
Qll	Lavas de Lusitania	10

La explicación y los criterios empleados para la clasificación, desde el material más fuerte (menor peso asignado) al más débil, se dan a continuación:

Los materiales más fuertes son las rocas, primero las lavas de Lusitana y los Gabros de Olivares, porque se trata de bloques macizos de roca, que por su compacidad son difícilmente deslizables. La Formación Quebradagrande corresponde a rocas metasedimentarias con planos de exfoliación y estratificación que generarían potenciales superficies de falla. Las Formaciones Casabianca y Manizales son flujos de escombros y lodos de edad terciaria, por lo cual se pueden considerar más estables que los flujos de escombros y lodos más recientes, pues su matriz sufre procesos de cementación que le confieren mayor estabilidad. Los depósitos aluviales, los depósitos fluviovolcánicos, los flujos de lodos y los flujos de escombros presentan aproximadamente el mismo comportamiento desde un punto de vista amplio, porque se trata de material arrastrado, con una matriz más susceptible a desprendimiento y meteorización al tratarse de un material de edad

cuaternaria. Los depósitos coluviales se originan a partir de desprendimientos en zonas de fuertes pendientes y están constituidos por bloques de roca dentro de una matriz. Los depósitos de caída piroclástica son cenizas volcánicas que pueden incluir además arena, limo, arcilla, lapilli, presentes según la topografía en capas de espesores grandes en los valles y menores en las zonas inclinadas. Por último, con la mayor susceptibilidad a deslizamientos, se encuentran los llenos (más frágiles) y las explanaciones, que al ser terrenos con marcada intervención antrópica, y por ende, con acentuada alteración, se convierten en el material con mayor propensión a presentar fallas y deslizamientos.

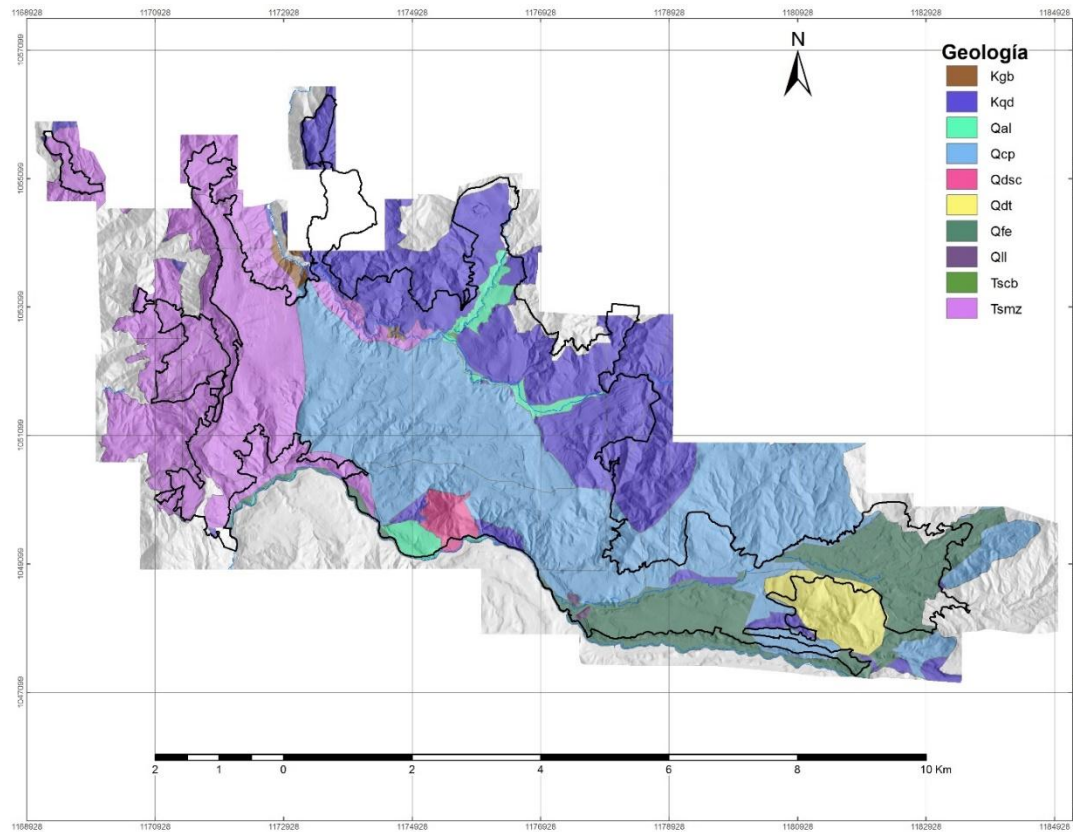


Figura 76. Geología del área de estudio

3.2.2.1.2. Geomorfología

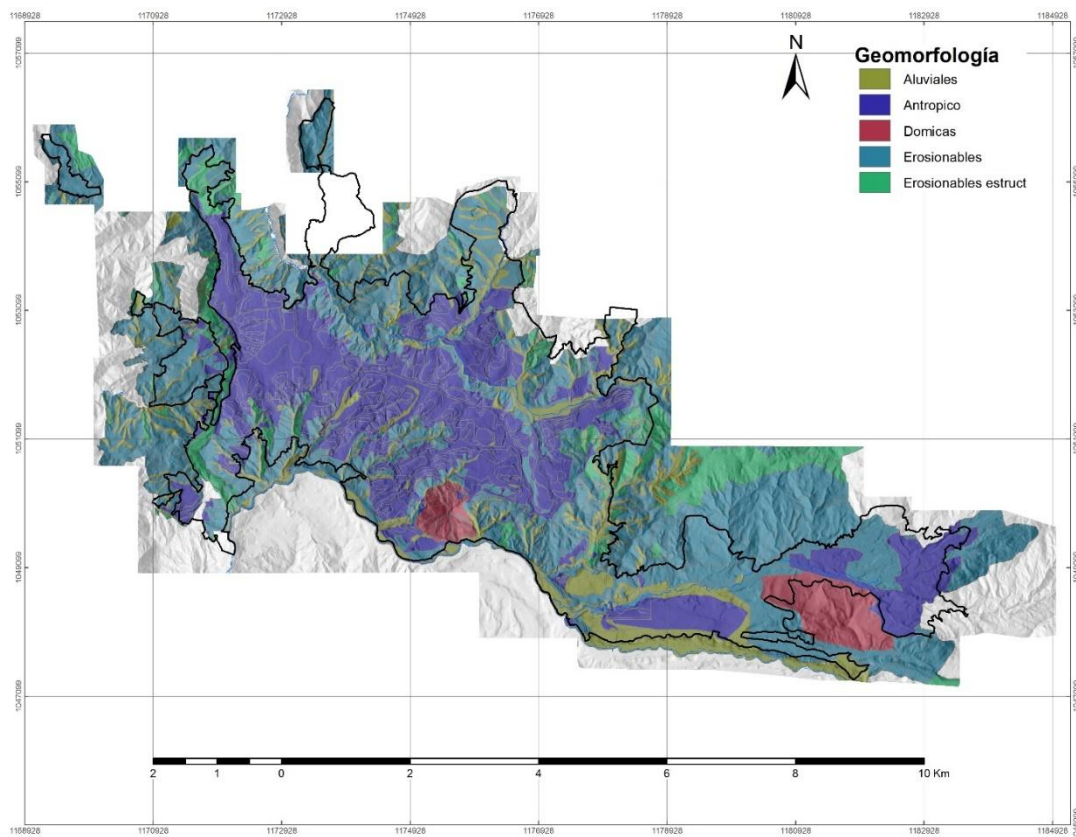


Figura 77. Geomorfología del área de estudio

3.2.2.1.3. Formaciones superficiales

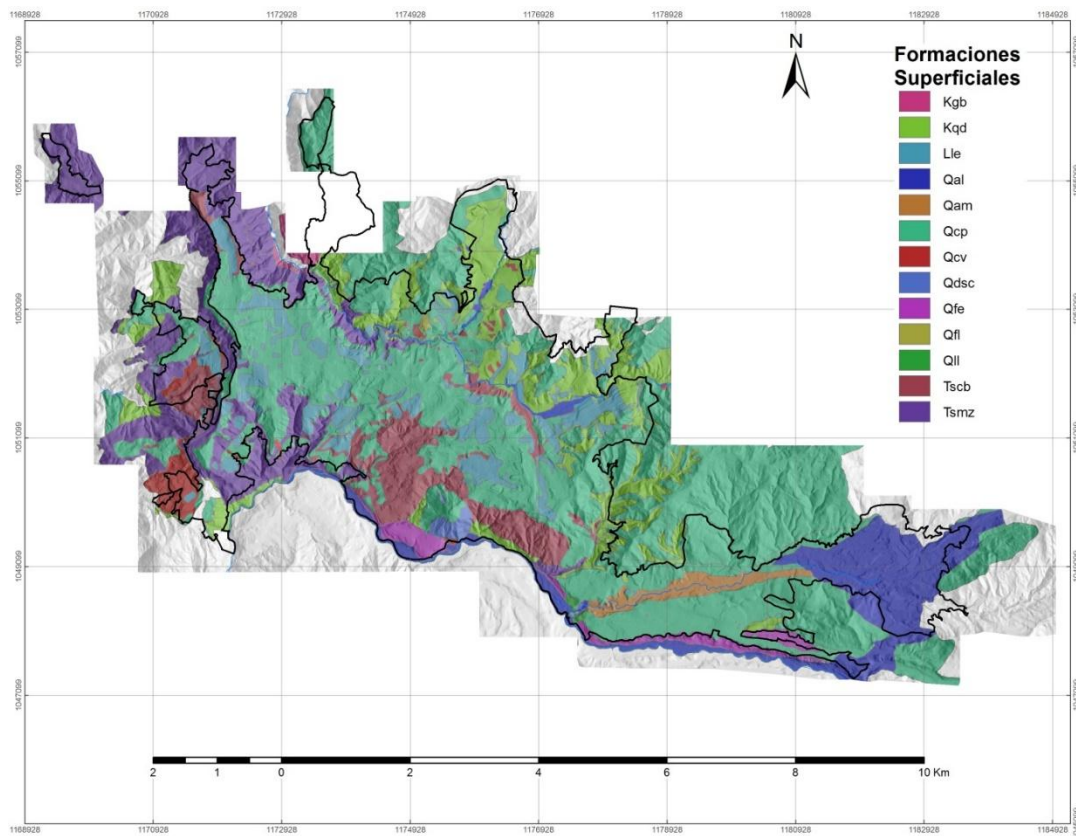


Figura 78. Formaciones superficiales

3.2.2.1.4. Mapa de cobertura

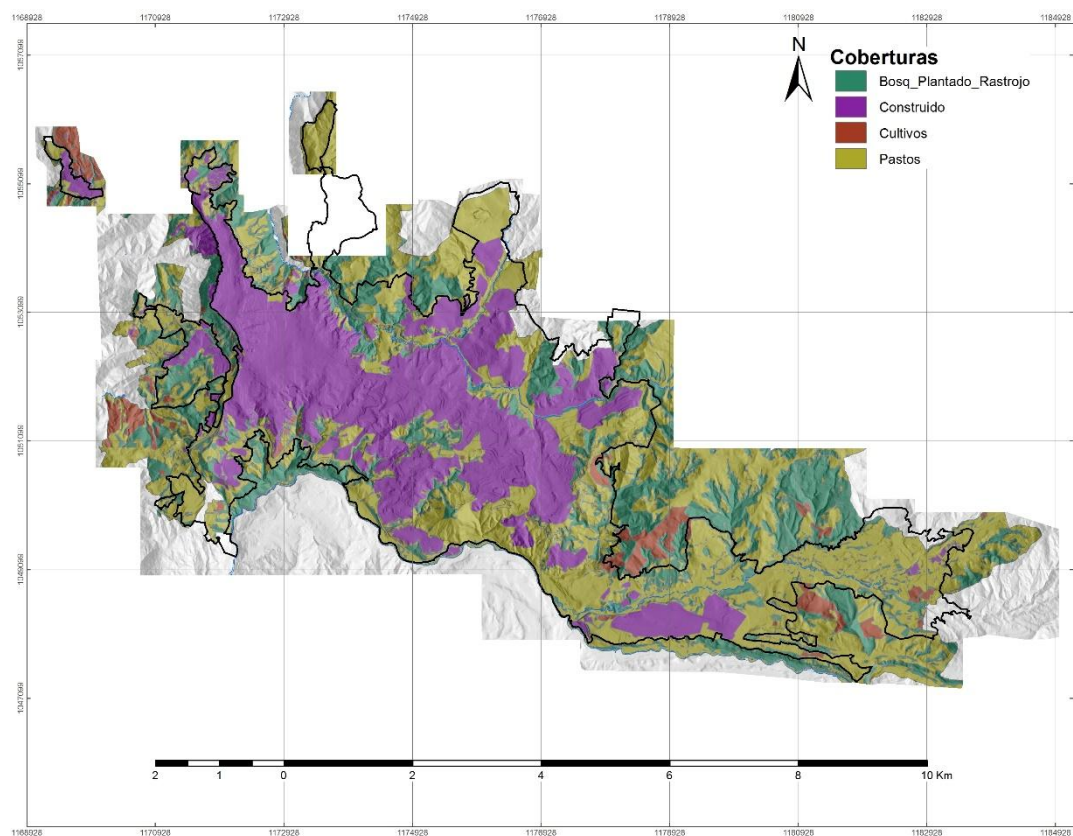


Figura 79. Mapa de usos del suelo

Sería deseable poder incorporar un mapa detallado que dé cuenta de estas características con un buen grado de resolución, incluyendo patios traseros de casas, vías, zonas verdes, coberturas boscosas y densidades de éstas, etc. En el presente estudio se ha utilizado un mapa general de usos del suelo proveniente del POT (Municipio de Manizales 2003) que divide las áreas en cuatro categorías según su cobertura: Construido, Cultivos, Pastos y Bosque Plantado y Rastrojos.

Para su espacialización y tratamiento numérico, se han asignado valores a estas categorías (Tabla 39), que reflejan el grado de permeabilidad del terreno y la acción fijadora de la cobertura vegetal. Se supone que un suelo más permeable, será más susceptible de saturarse y posteriormente, deslizarse.

Tabla 39. Asignación de peso a Usos del Suelo en Manizales

Código	Nombre	Peso asignado
1	Construido	10
2	Pastos	60
3	Cultivos	100
4	Bosque Plantado y Rastrojos	80

3.2.2.2. Derivados de la topografía

3.2.2.2.1. *Modelo digital de elevaciones*

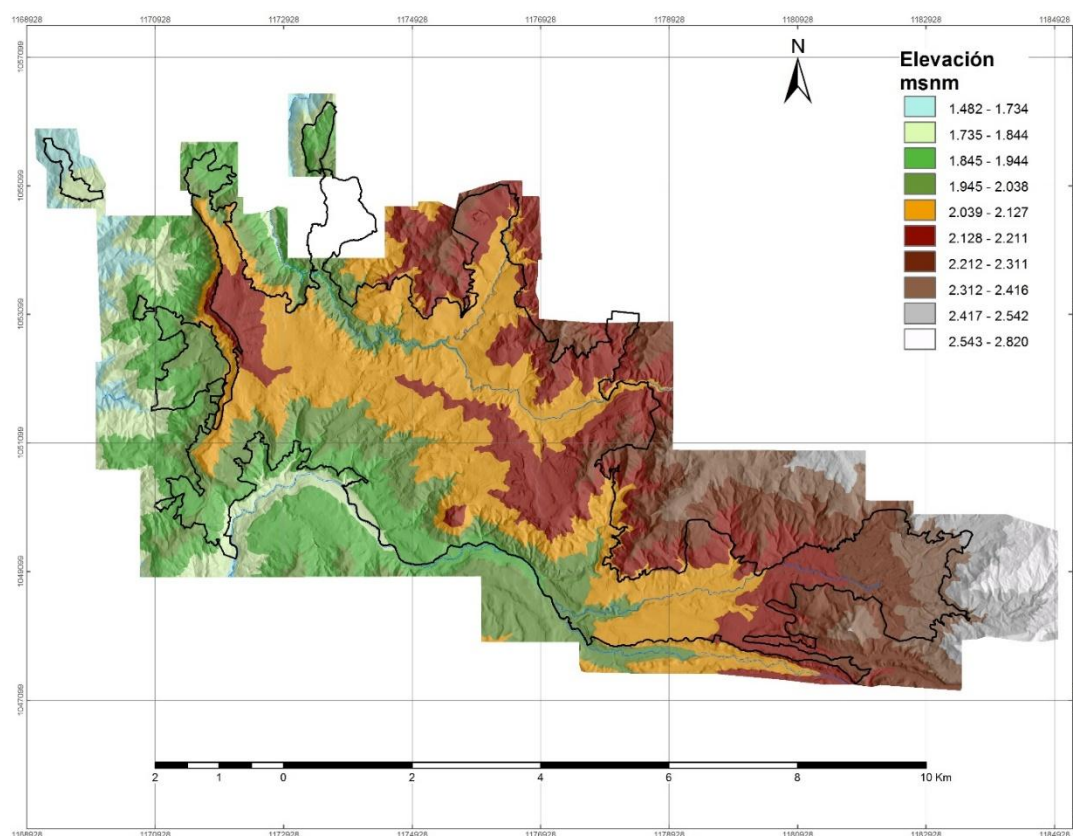


Figura 80. Modelo digital de elevaciones

3.2.2.2.2. *Pendiente*

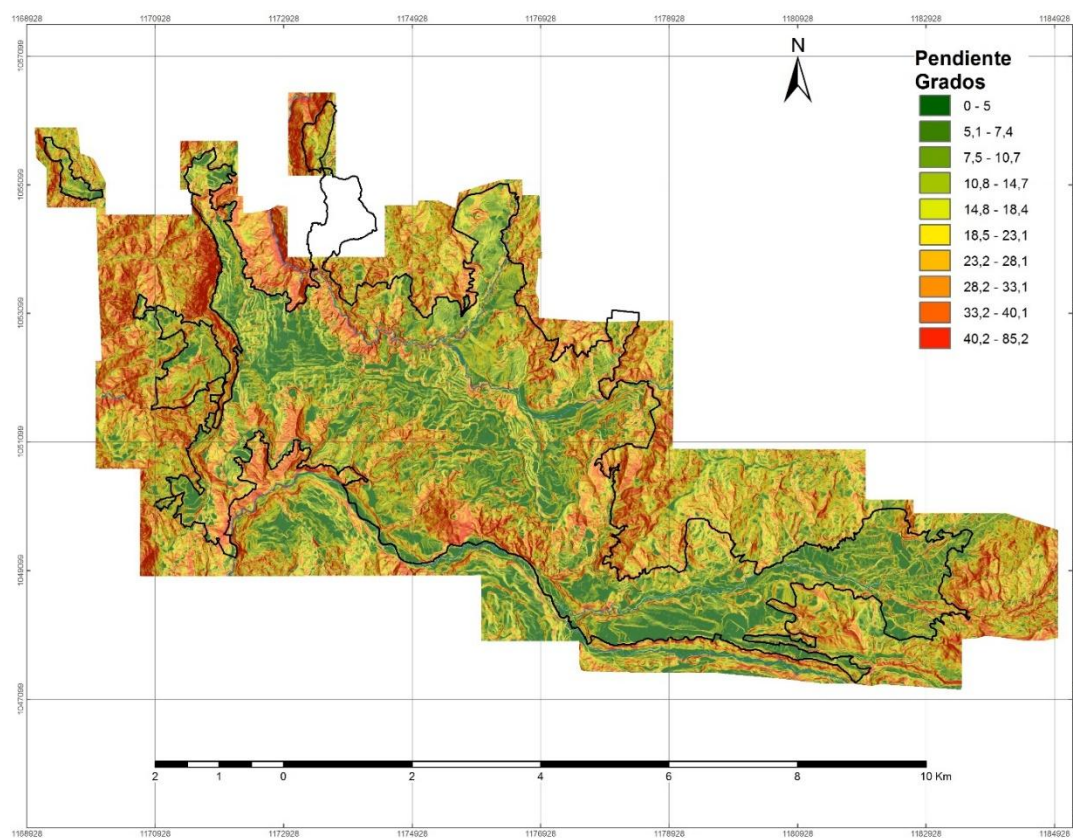


Figura 81. Pendiente del Terreno

3.2.2.2.3. Pendiente transformada

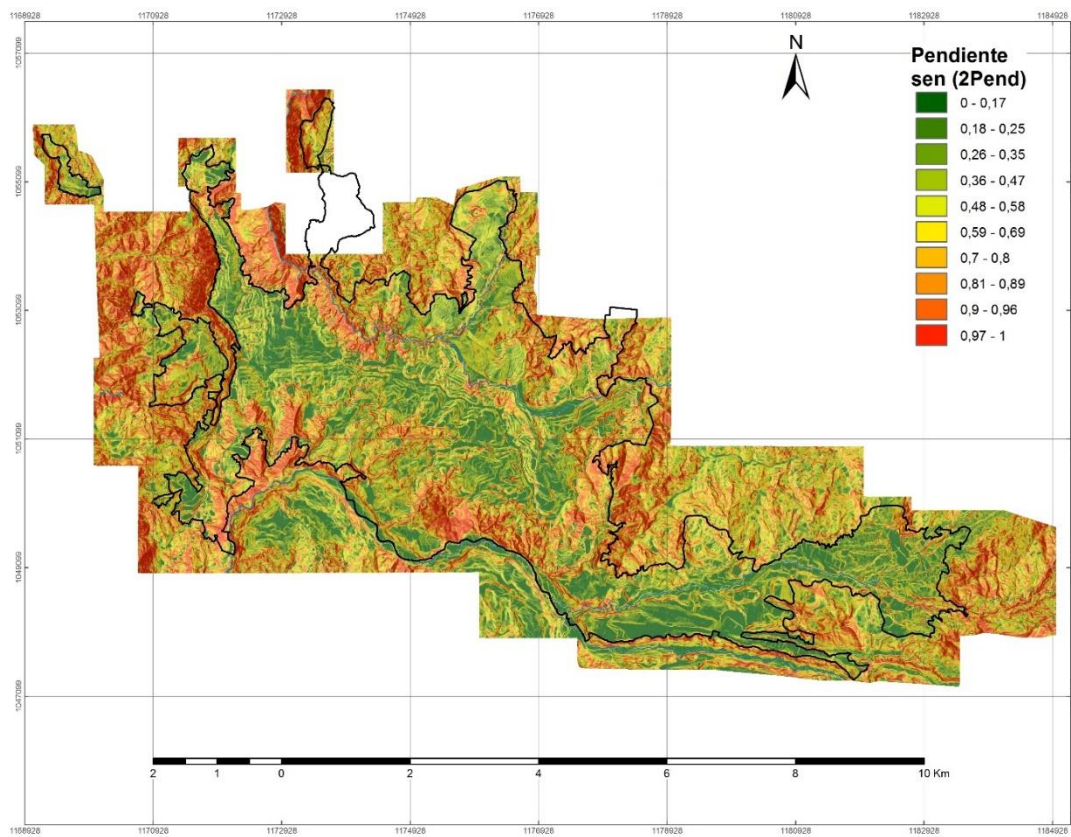


Figura 82. Pendiente transformada del terreno

3.2.2.2.4. Orientación de las laderas

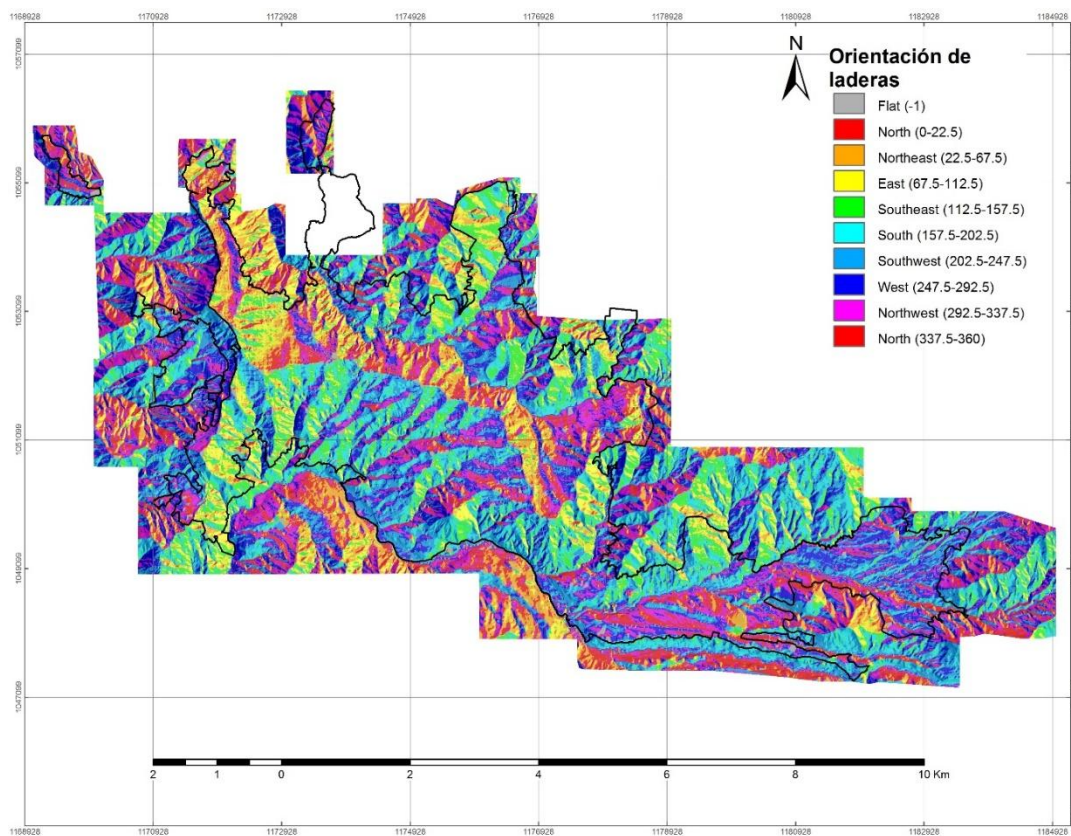


Figura 83. Orientación del terreno

3.2.2.2.5. *Curvatura de la superficie*

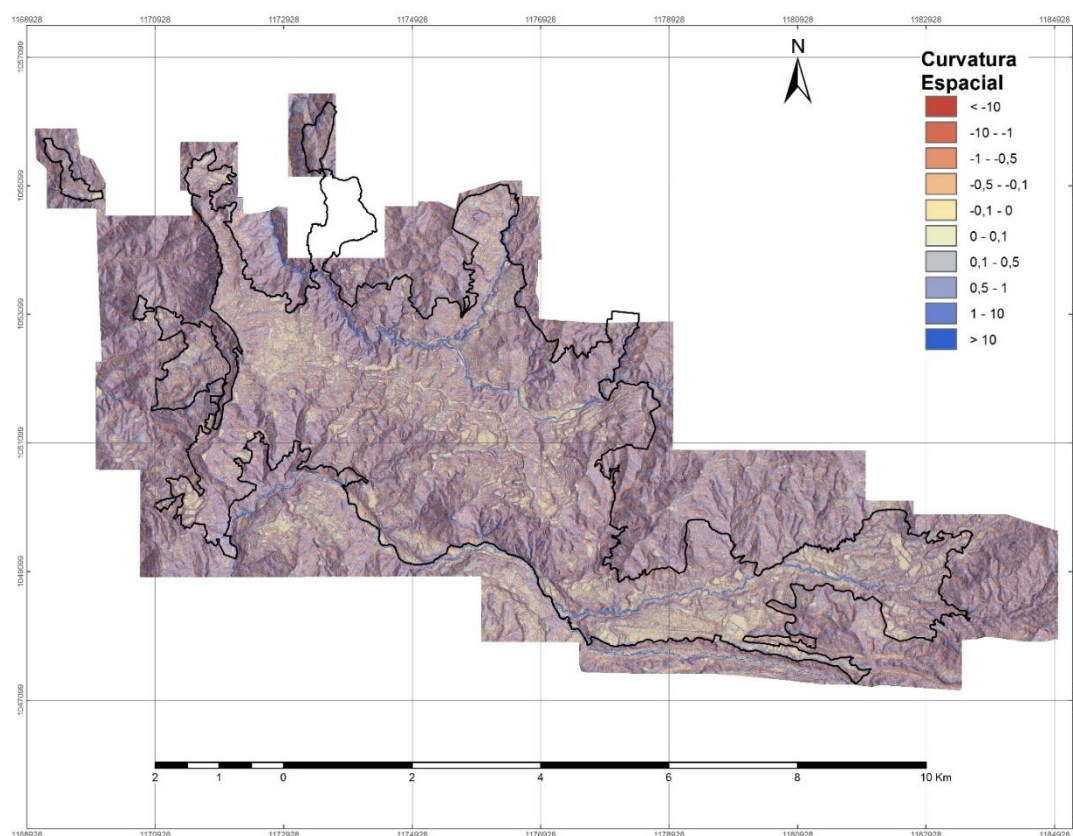


Figura 84. Curvatura del terreno

3.2.2.2.6. *Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente*

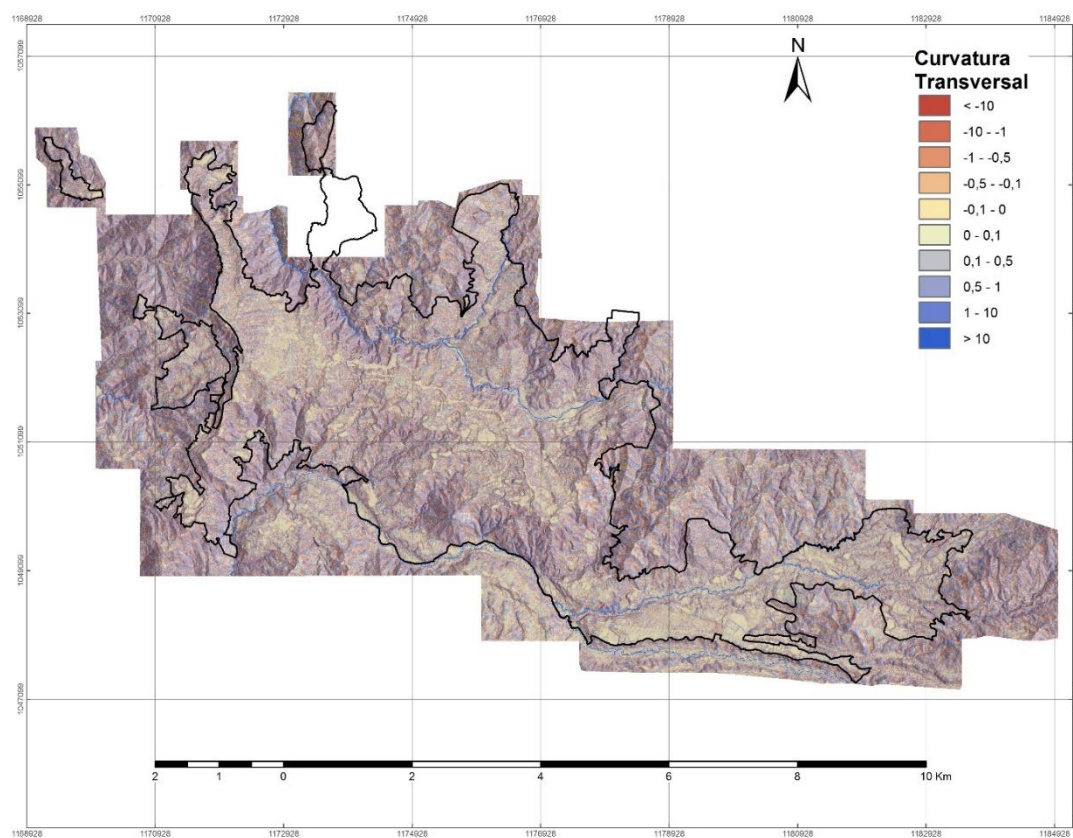


Figura 85. Convexidad/Concavidad transversal del terreno

3.2.2.2.7. Curvatura en el sentido de la pendiente

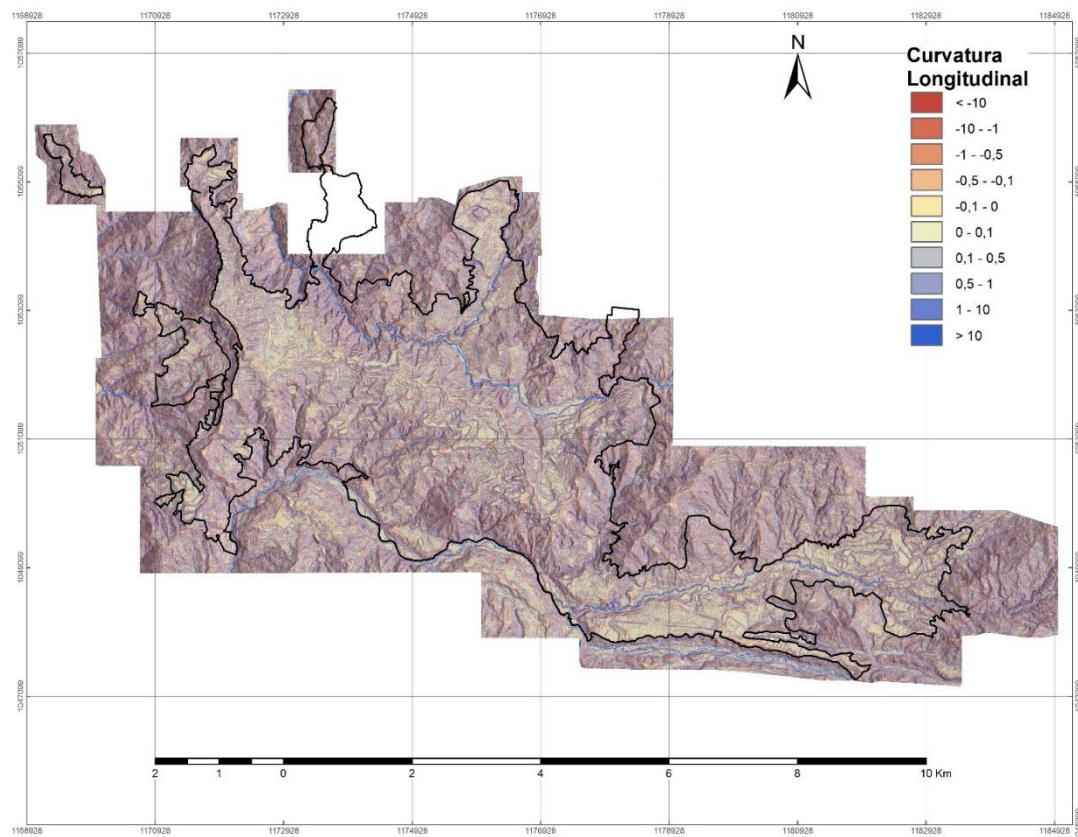


Figura 86. Convexidad/Concavidad longitudinal del terreno

3.2.2.2.8. Área de cuenca vertiente

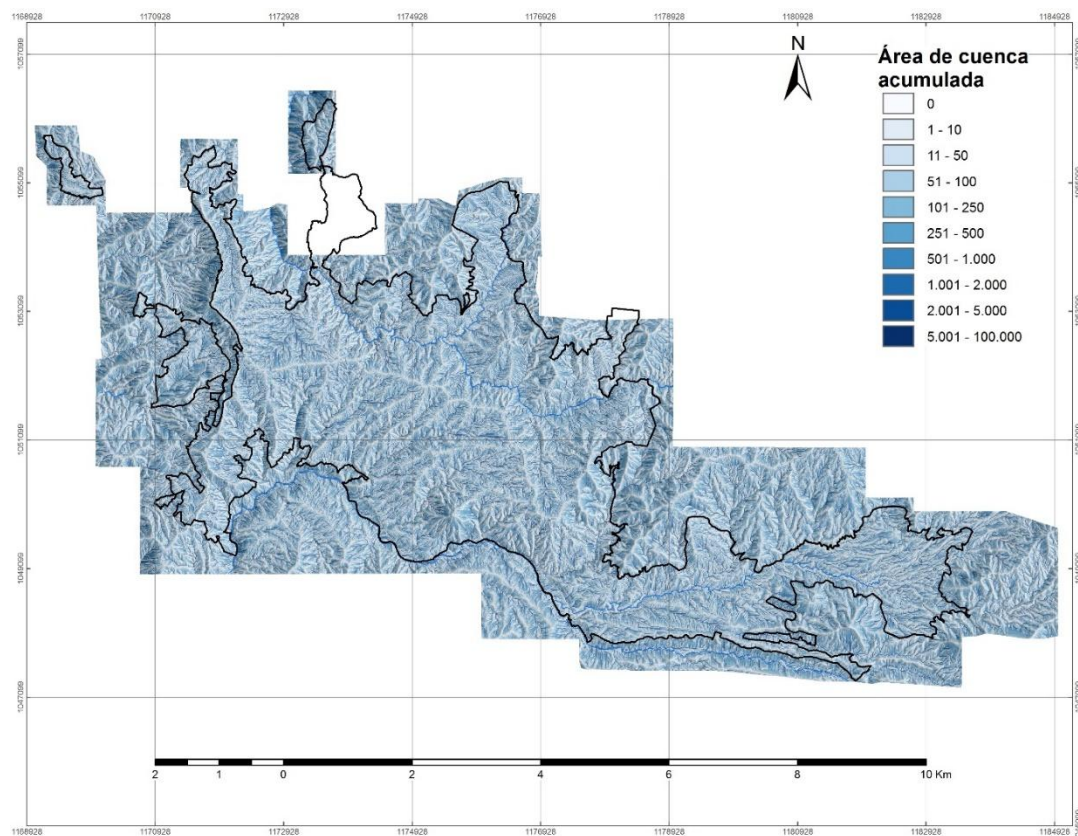


Figura 87. Área de cuenca vertiente

3.2.2.2.9. Longitud de flujo

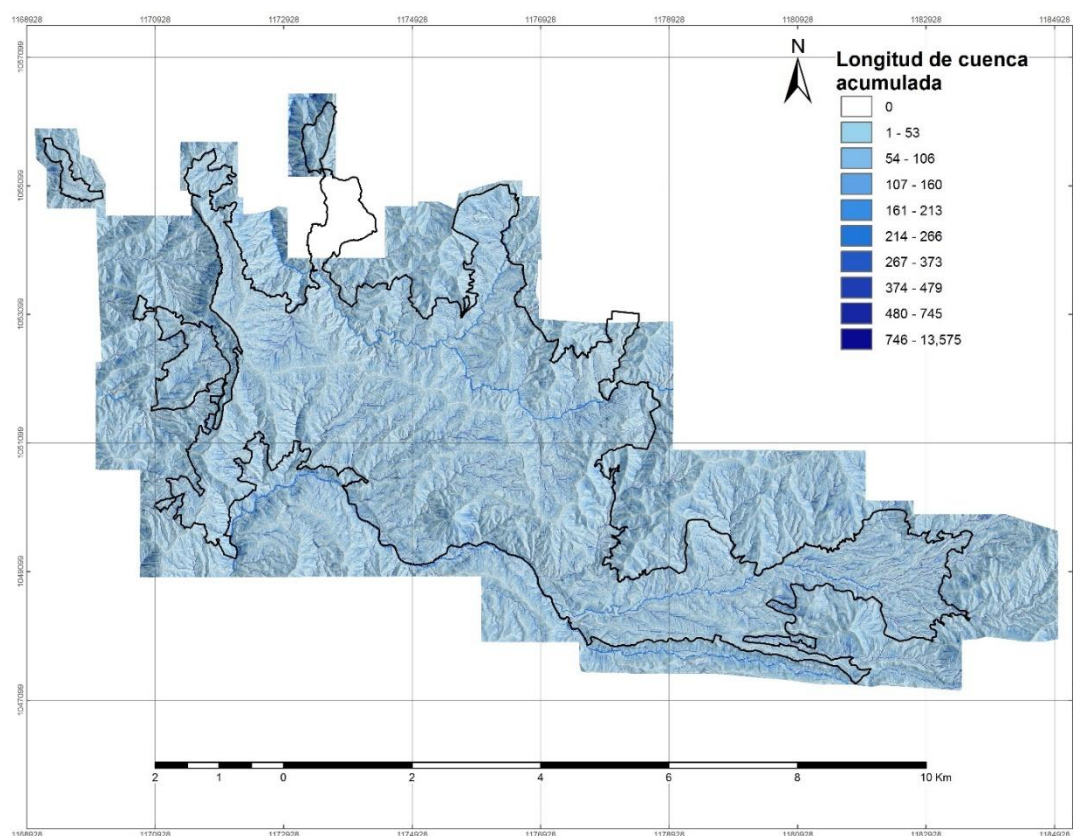


Figura 88. Longitud de cuenca vertiente

3.2.2.2.10. Insolación incidente en el terreno

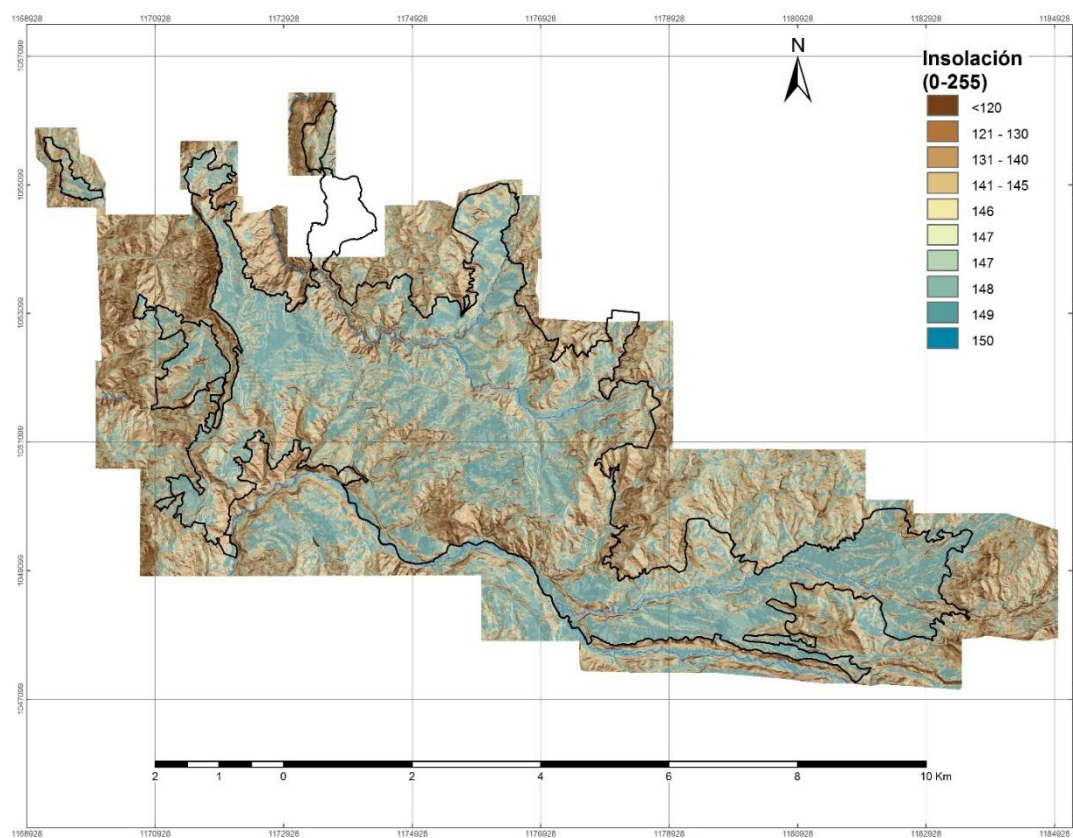


Figura 89. Insolación

3.2.2.2.11. Rugosidad

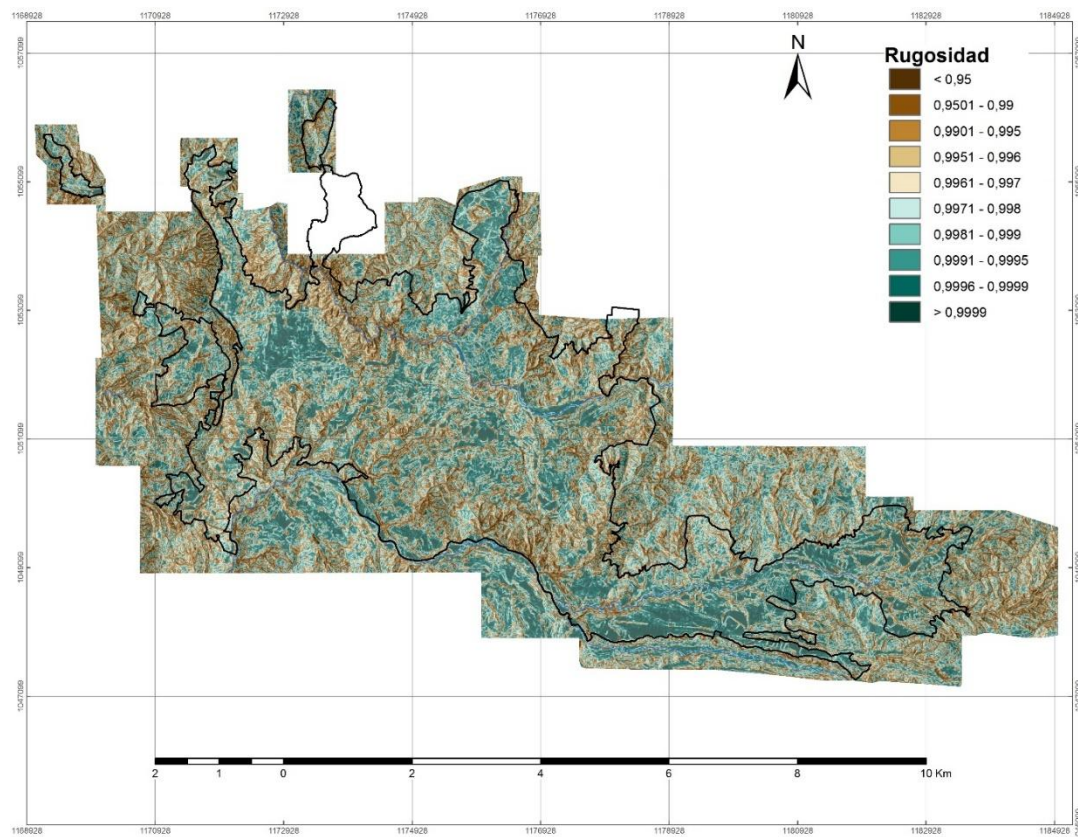


Figura 90. Rugosidad del Terreno

3.2.2.3. Distancia a elementos clave

3.2.2.3.1. Distancia a fallas y lineamientos

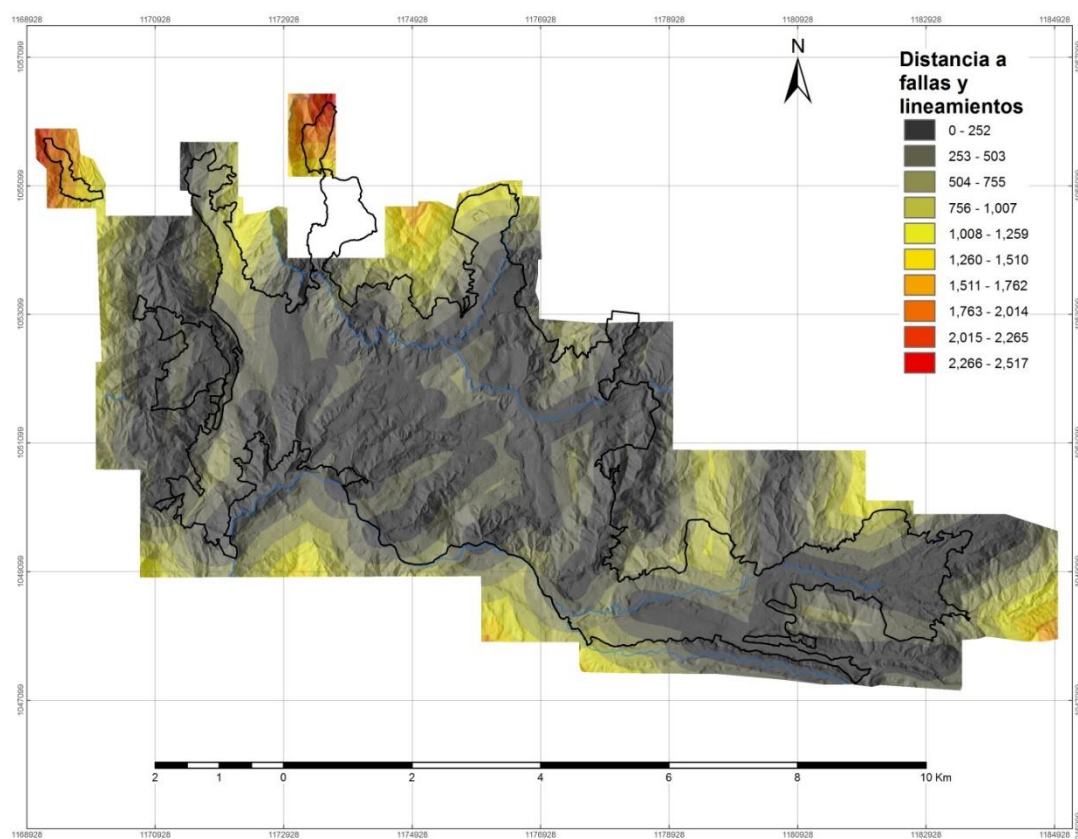


Figura 91. Distancia a fallas y lineamientos

3.2.2.3.2. Distancia a vías y carreteras

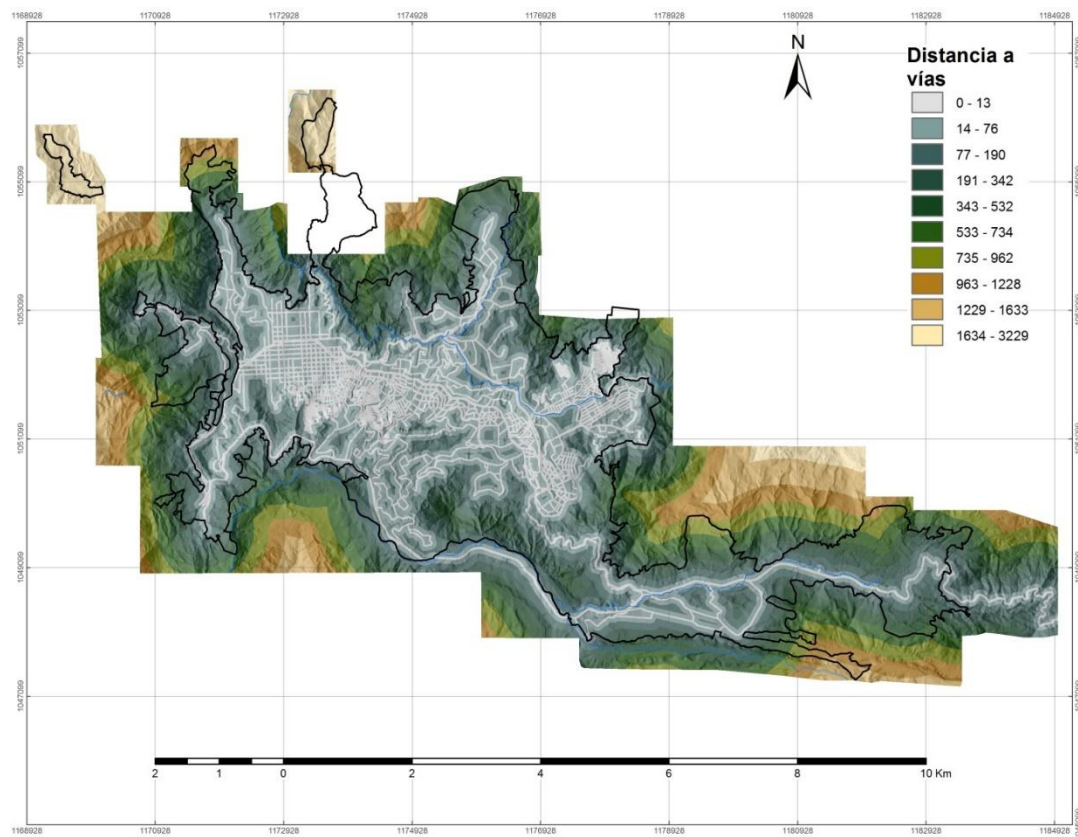


Figura 92. Distancia a la malla vial

3.2.2.3.3. Distancia a drenajes

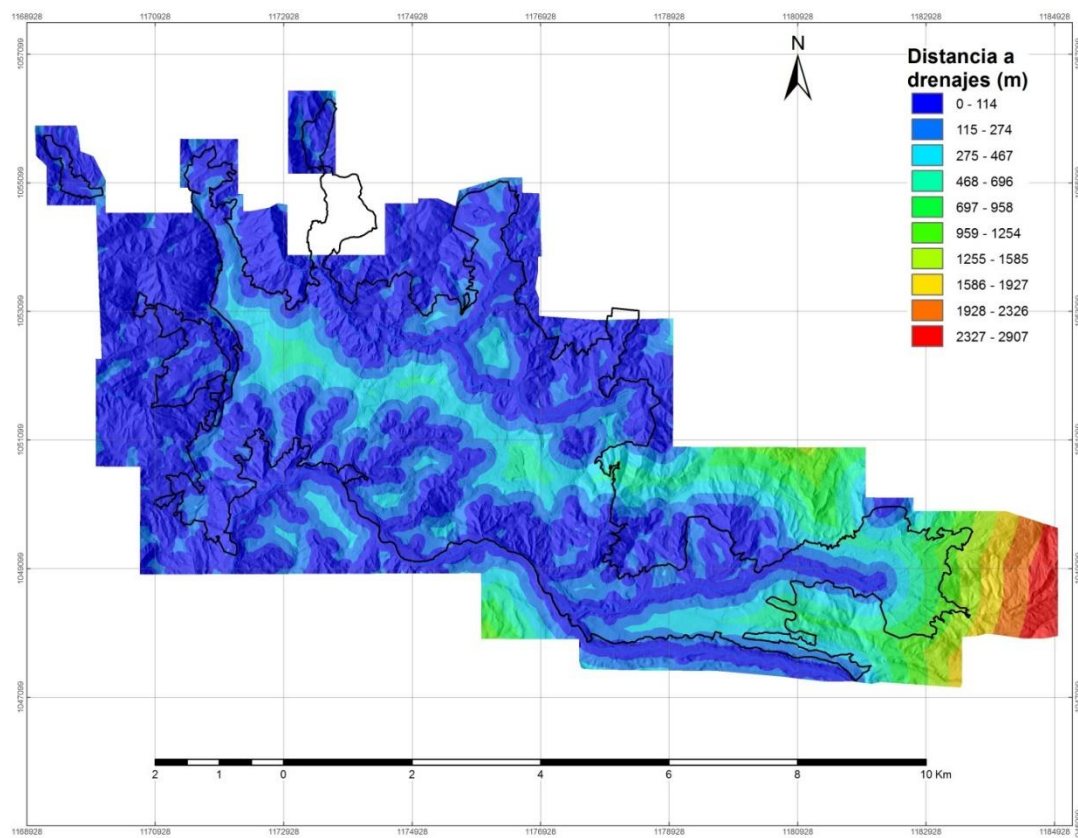


Figura 93. Distancia a ríos y quebradas

3.2.2.3.4. Distancia a la red de acueducto

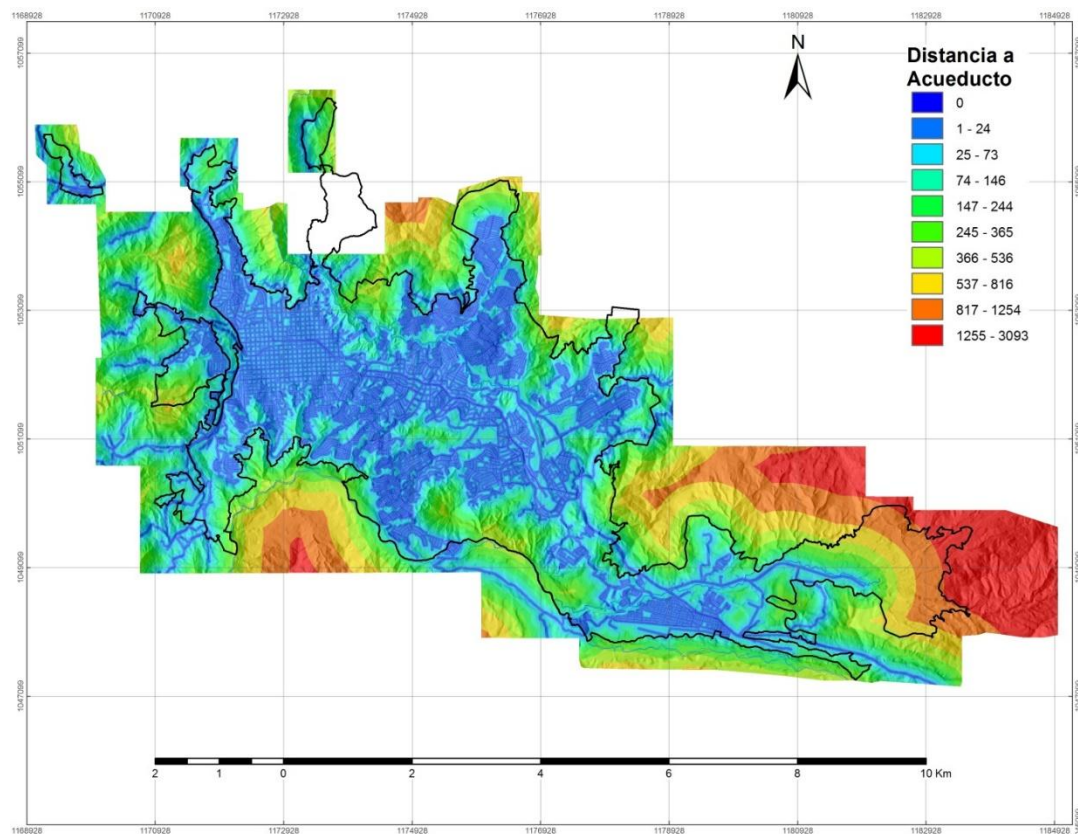


Figura 94. Distancia a red de acueducto

3.2.2.3.5. Distancia a la red de alcantarillado

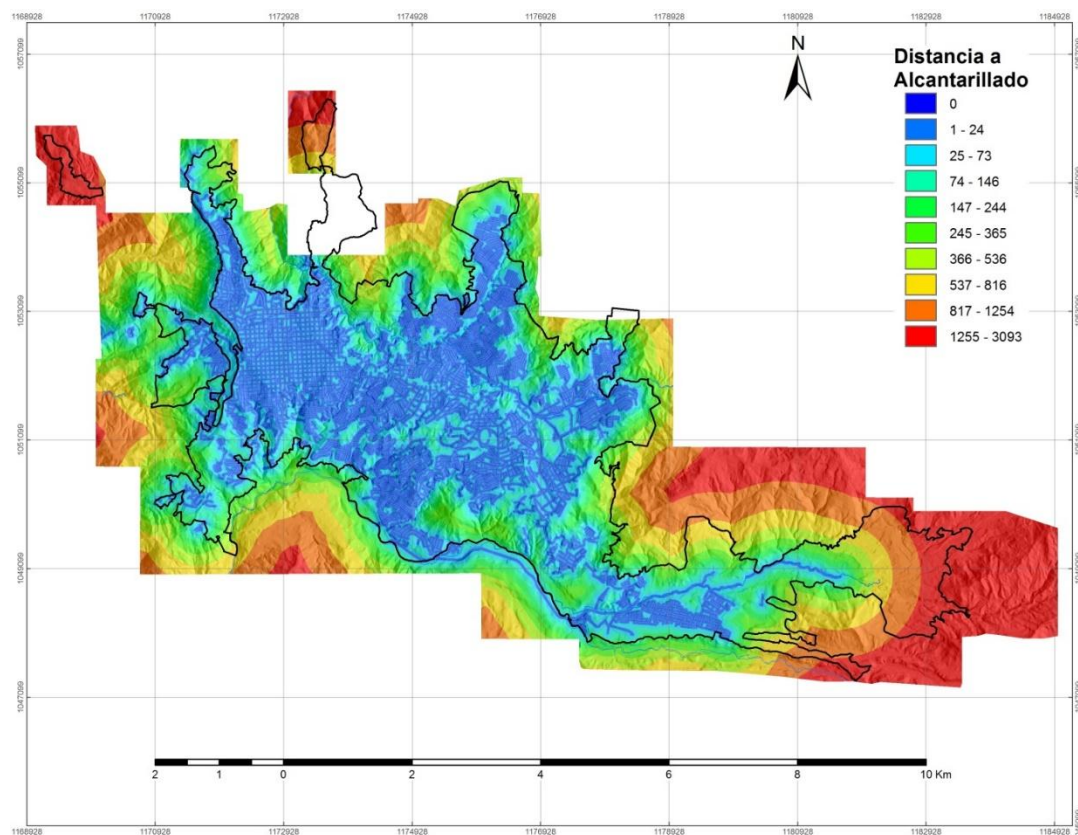


Figura 95. Distancia a red de alcantarillado

3.2.2.3.6. Distancia a ríos

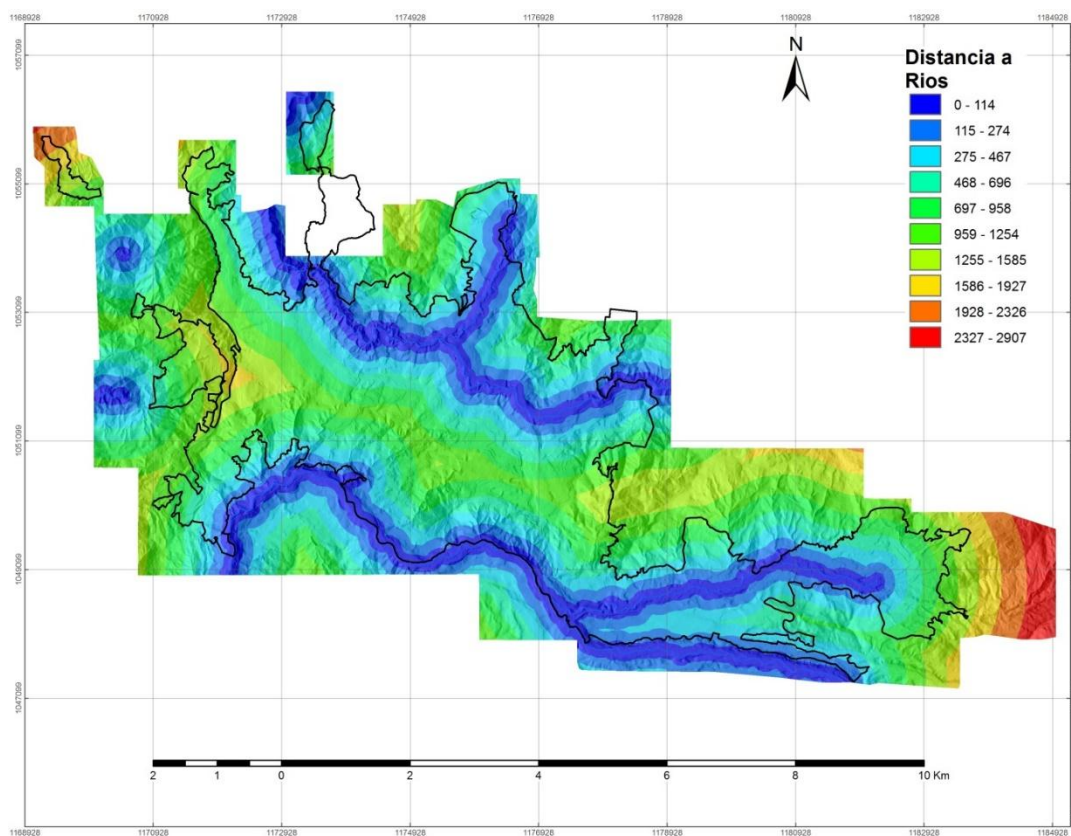


Figura 96. Distancia a ríos principales

3.2.2.4. Socio-demográficos

Variable similar a Población; aquí se evidencia con mayor claridad la variabilidad espacial de la exposición, y sus diferentes niveles según el grado de intervención, representado en disponibilidad de infraestructuras, tratamientos geotécnicos y zonas construidas.

3.2.2.4.1. Densidad de viviendas

Con datos de número de viviendas y áreas del POT 2003 (Municipio de Manizales 2003).

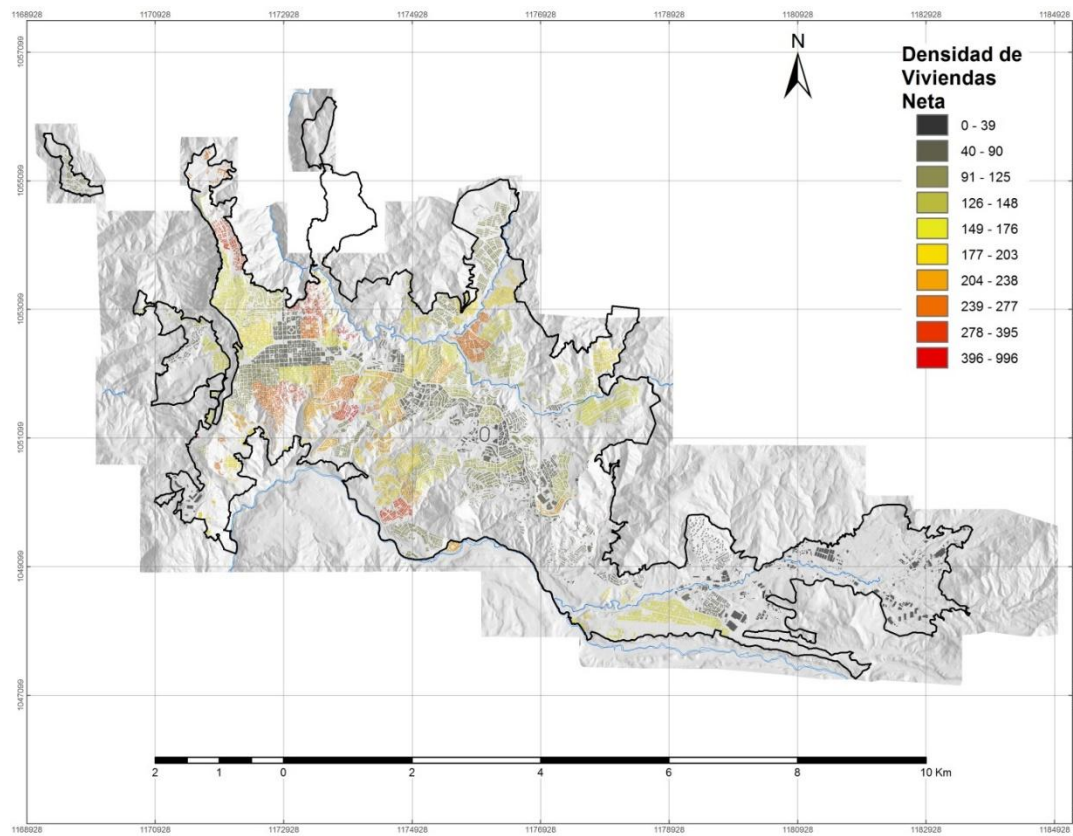


Figura 97. Densidad neta de viviendas

3.2.2.4.2. Densidad poblacional bruta

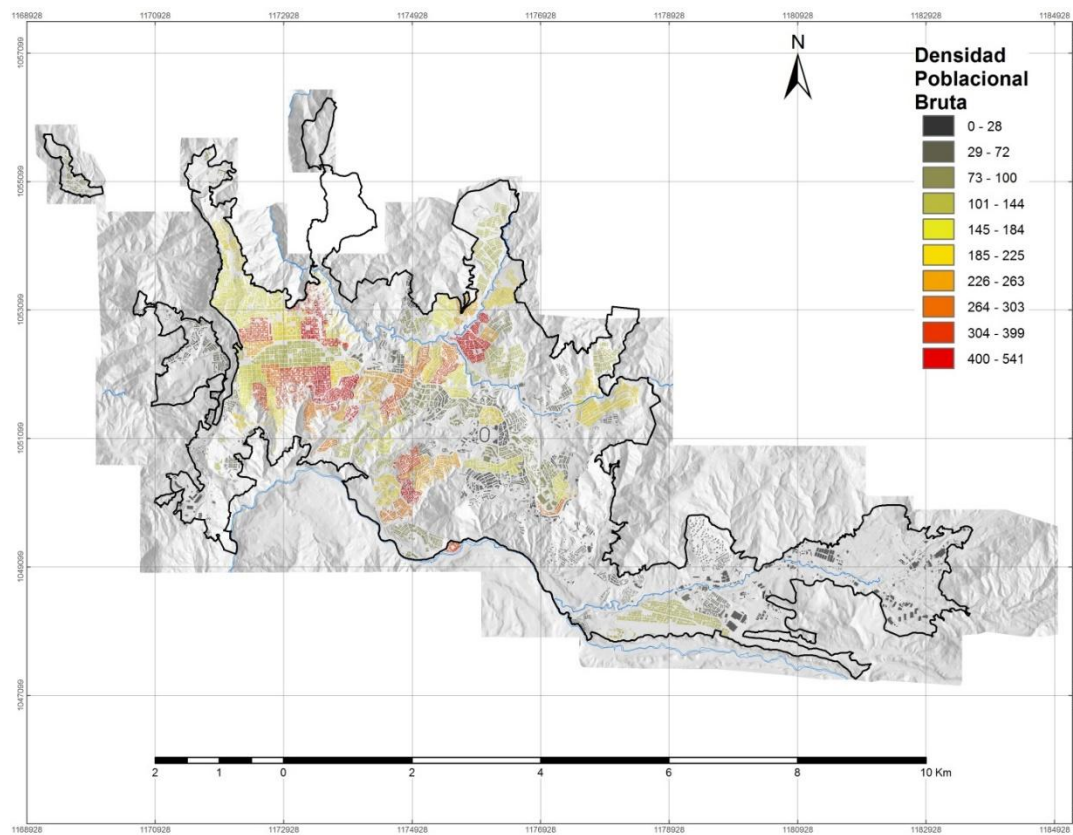


Figura 98. Densidad poblacional bruta

3.2.2.4.3. *Densidad poblacional neta*

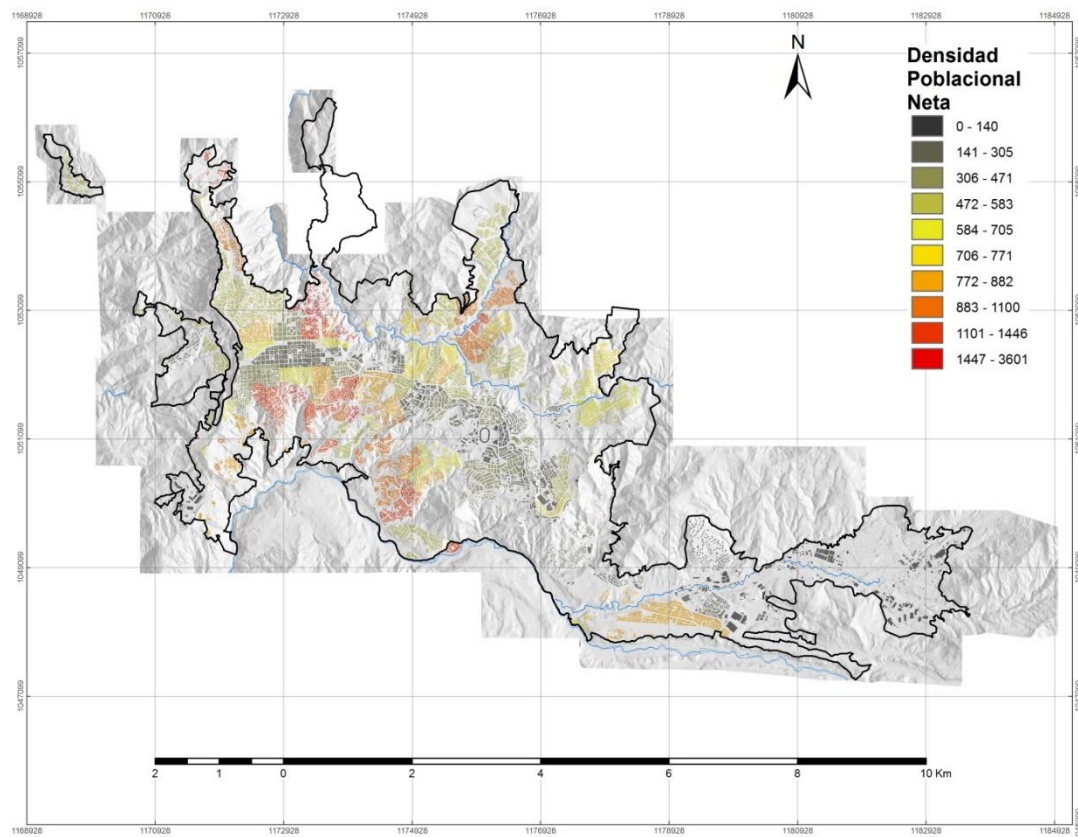


Figura 99 Densidad poblacional neta

Para su cálculo se utilizan los datos de población municipales del año 2003 y las áreas de los barrios del Plan de Ordenamiento Territorial (Municipio de Manizales 2003).

3.2.2.4.4. *Viviendas en un radio de 50 m*

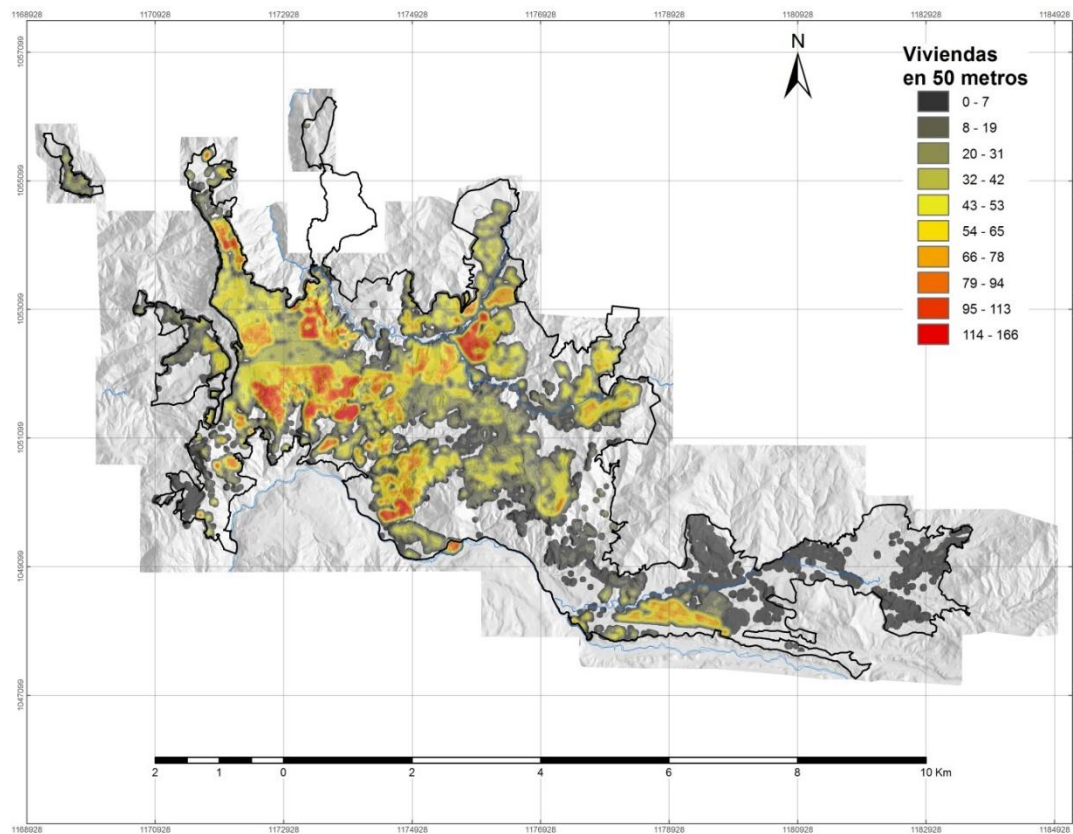


Figura 100. Número de viviendas en un radio de 50 metros

3.2.2.4.5. *Habitantes en un radio de 50 metros*

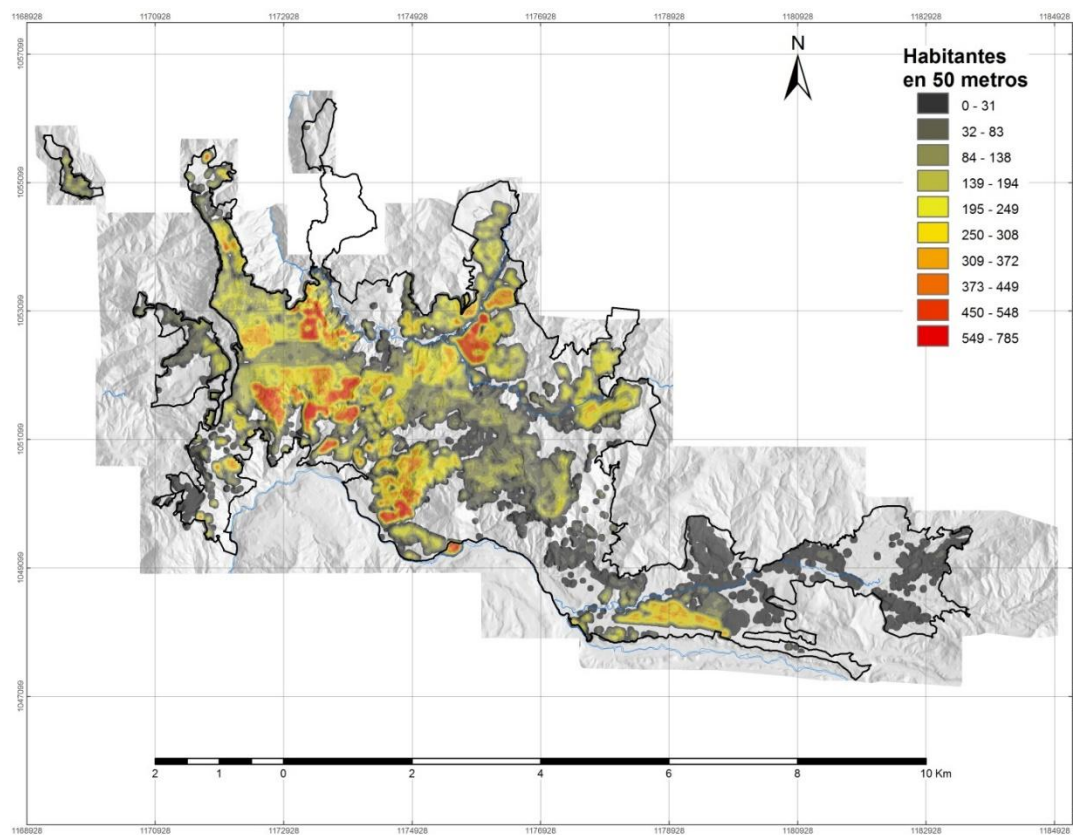


Figura 101. Habitantes en un radio de 50 metros

3.2.2.4.6. Estrato socioeconómico

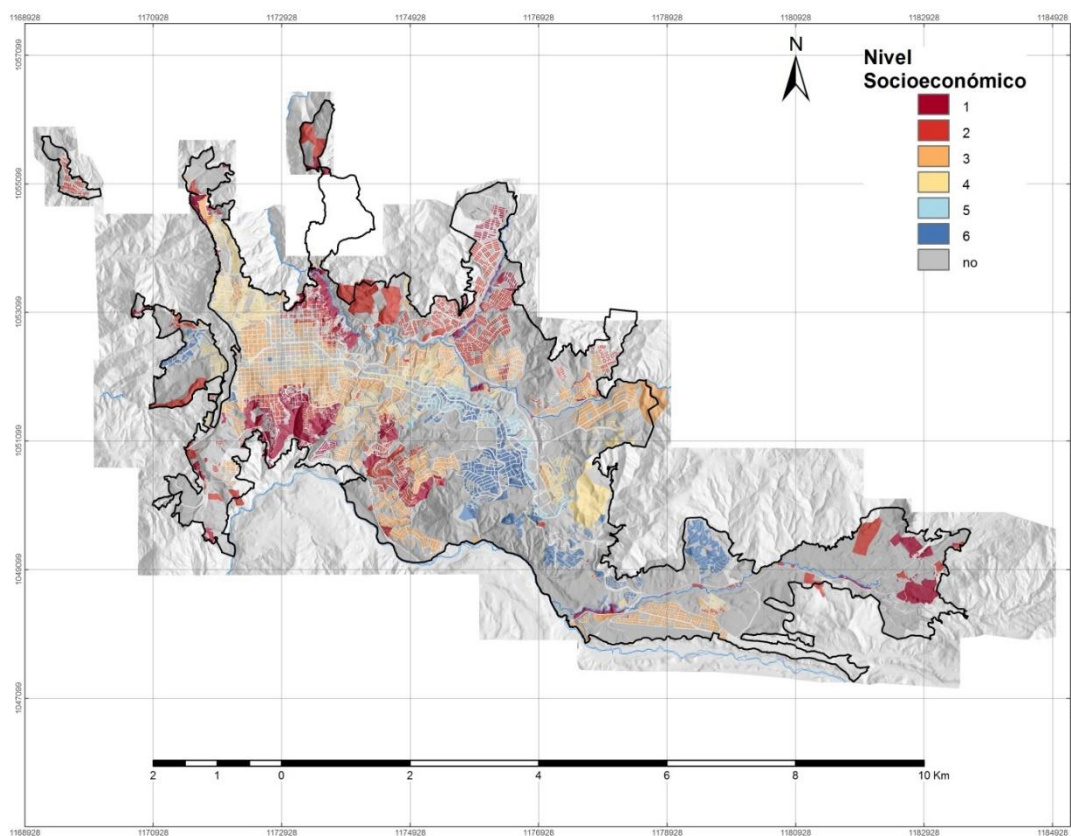


Figura 102. Nivel socioeconómico de los habitantes

3.2.3. Muestra de análisis

Para evitar problemas de dependencia estadística se debe extraer igual número de ejemplares (puntos) correspondientes a valores mínimos de susceptibilidad (Santacana 2001). Si se asume que el inventario es exhaustivo, puede hacerse un muestreo aleatorio en la zona donde no existen eventos registrados para extraer tales datos de zona estable. Es importante considerar una “zona de influencia” alrededor de cada punto de deslizamiento, suponiendo que también es una zona afectable, y por lo tanto no puede tomarse como “estable”; para este efecto se ha utilizado un buffer de 20m en torno a cada punto del inventario de deslizamientos, justificado en el hecho de que los datos históricos de eventos presentan un área inferior. De esta forma se obtiene una muestra de análisis con $327 \times 2 = 654$ puntos en el terreno, entre estables e inestables (Figura 103).

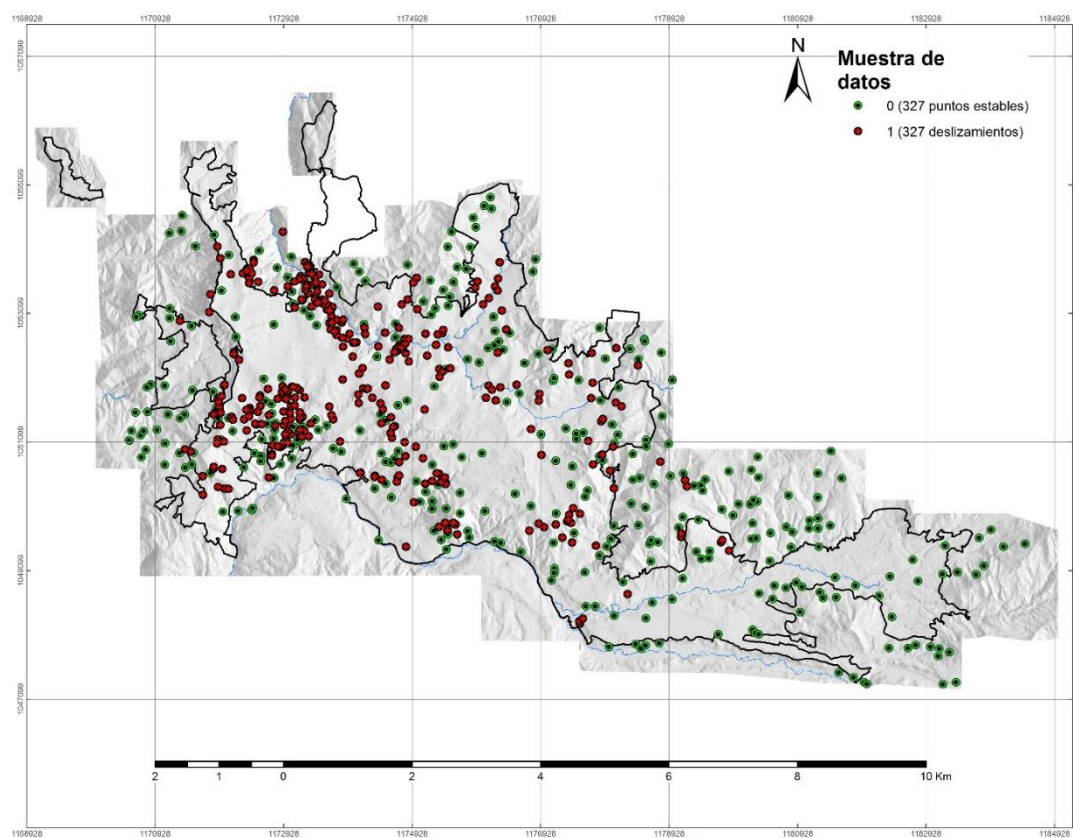


Figura 103. Muestra de análisis

Con la ubicación de cada uno de los puntos expresados en el mapa anterior es posible ir extractando el valor de cada uno de los parámetros descritos en la Tabla 37. De esta forma se configura una matriz de datos con 654 filas correspondientes a igual número de puntos en la muestra de análisis y 29 filas correspondientes a igual número de factores de propensividad, adicionando dos columnas extras para tener en cuenta las coordenadas X, Y de cada punto, y una más para clasificar la condición de cada punto como estable (0) o inestable (1).

Una vista parcial de esta muestra de análisis se presenta en la Tabla 40. Las columnas corresponden a los 29 factores de propensividad, con una columna extra que da cuenta del nivel de susceptibilidad del terreno (0, 1). En cuanto a número de filas, está constituida por los 327 datos provenientes del inventario de deslizamientos (1), más otros 327 datos seleccionados aleatoriamente del área estable (0).

Tabla 40. Muestra de análisis para elaboración de modelos de susceptibilidad

X	Y	ACCA	ASPE	SINA	COSA	ATGE	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPBR	DPNE	DRIO	DVIA	DVNE	ESTR	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SE2P	SLOP	V50M	DESL	
1171961	1053432	0.00	0.27	1.00	0.43	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.00	0.52	0.24	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	1.00	0.70	0.63	0.20	0.21	0.99	0.00	1.00	0.27	0.09	0.01	0	
1178210	1048923	0.00	0.21	0.98	0.64	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.45	0.19	0.00	0.00	0.13	0.03	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.01	0.99	0.01	1.00	0.27	0.09	0.01	0	
1178493	1047884	0.00	0.51	0.46	0.00	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.40	0.45	0.34	0.66	0.04	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	1.00	0.60	0.75	0.60	0.00	0.98	0.00	1.00	0.27	0.09	0.00	0	
1179319	1050420	0.00	0.60	0.20	0.10	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.27	0.40	0.15	0.67	0.23	0.00	0.00	0.53	0.23	0.00	1.00	0.70	1.00	0.80	0.00	0.99	0.00	1.00	0.27	0.09	0.00	0	
1181107	1049753	0.00	0.25	1.00	0.52	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.21	0.17	0.20	0.55	0.19	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.94	0.28	0.10	0.00	0	
1183185	1049042	0.00	0.88	0.15	0.86	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.40	0.45	0.34	0.66	0.04	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	1.00	0.60	0.75	0.20	0.01	0.99	0.00	0.99	0.28	0.10	0.01	0	
1171153	1053027	0.00	0.69	0.03	0.32	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.02	0.03	0.03	0.34	0.07	0.11	0.15	0.41	0.02	0.13	1.00	0.50	0.63	1.00	0.12	0.99	0.01	1.00	0.28	0.10	0.13	0	
1172738	1051691	0.00	0.40	0.80	0.10	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.08	0.46	0.10	0.41	0.36	0.40	0.00	0.28	0.13	0.70	0.63	0.20	0.55	0.99	0.00	1.00	0.28	0.10	0.60	0	
1177322	1051311	0.00	0.98	0.43	0.99	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.03	0.04	0.48	0.07	0.00	0.00	0.07	0.03	0.00	1.00	1.00	0.38	0.20	0.55	0.99	0.00	1.00	0.28	0.10	0.60	0	
1180209	1049593	0.00	0.45	0.66	0.03	0.00	0.60	0.88	0.35	0.78	0.14	0.14	0.00	0.52	0.16	0.00	0.00	0.17	0.18	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.98	0.04	0.90	0.31	0.11	0.00	0	
1182369	1049009	0.00	0.73	0.00	0.44	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.15	0.22	0.06	0.59	0.01	0.00	0.00	0.06	0.09	0.00	1.00	0.60	0.75	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.31	0.11	0.00	0	
1174449	1050922	0.00	0.64	0.11	0.18	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.03	0.36	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.20	0.36	0.99	0.00	1.00	0.32	0.11	0.41	0
1174105	1053746	0.00	0.44	0.68	0.03	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.14	0.04	0.42	0.27	0.00	0.00	0.17	0.19	0.00	1.00	0.70	0.38	1.00	0.00	0.98	0.01	1.00	0.33	0.11	0.00	0	
1175572	1051063	0.00	0.03	0.59	0.99	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.01	0.03	0.46	0.06	0.00	0.00	0.31	0.04	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.20	0.00	0.98	0.00	0.99	0.34	0.12	0.00	0
1172897	1052096	0.00	0.52	0.44	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.14	0.47	0.07	0.00	0.00	0.45	0.01	0.00	0.25	0.70	0.63	0.20	0.34	0.97	0.00	1.00	0.35	0.12	0.39	0	
1173700	1050998	0.00	0.51	0.48	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.03	0.34	0.09	0.00	0.00	0.17	0.02	0.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.54	0.97	0.01	1.00	0.35	0.12	0.47	0	
1178045	1051371	0.00	0.58	0.27	0.06	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.10	0.54	0.02	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.10	0.98	0.00	0.98	0.35	0.12	0.11	0	
1177146	1049133	0.00	0.74	0.00	0.46	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.02	0.03	0.39	0.14	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.97	0.36	0.12	0.00	0	
1176166	1054729	0.00	0.46	0.62	0.02	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.03	0.03	0.50	0.35	0.00	0.00	0.12	0.05	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.00	0.97	0.01	1.00	0.36	0.12	0.00	0	
1173034	1051216	0.00	0.21	0.98	0.63	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.03	0.01	0.35	0.04	0.00	0.00	0.21	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	1.00	0.02	0.95	0.00	0.99	0.85	0.34	0.01	1	
1173837	1052721	0.00	0.26	1.00	0.49	1.00	0.10	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.02	0.45	0.03	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.48	0.96	0.00	0.99	0.85	0.34	0.45	1	
1173753	1052760	0.00	0.82	0.04	0.71	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.45	0.06	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.13	0.70	1.00	1.00	0.51	0.95	0.00	0.99	0.85	0.34	0.49	1	
1173602	1053160	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.02	0.41	0.21	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.13	1.00	0.63	1.00	0.16	0.86	0.00	0.99	0.86	0.35	0.15	1	
1172400	1051630	0.00	0.41	0.77	0.08	0.00	0.10	0.88	0.34	0.79	0.01	0.01	0.01	0.44	0.04	0.00	0.00	0.43	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.09	0.89	0.00	0.97	0.86	0.35	0.12	1	
1173210	1051180	0.00	0.64	0.12	0.18	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.02	0.02	0.03	0.35	0.03	0.00	0.00	0.19	0.01	0.00	0.00	0.50	1.00	0.80	0.01	0.92	0.00	1.00	0.86	0.35	0.01	1	
1174060	1052650	0.00	0.29	0.99	0.39	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.03	0.01	0.40	0.06	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00	0.01	0.95	0.00	0.99	0.87	0.35	0.02	1	
1174700	1052520	0.00	0.86	0.12	0.82	0.00	0.60	0.89	0.34	0.78	0.02	0.02	0.00	0.45	0.09	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.25	0.50	0.63	0.20	0.07	0.88	0.00	0.99	0.88	0.36	0.08	1	
1172155	1052500	0.00	0.58	0.26	0.06	1.00	0.80	0.88	0.35	0.78	0.01	0.01	0.01	0.48	0.05	0.00	0.00	0.51	0.01	0.00	1.00	1.00	0.63	0.20	0.07	0.88	0.00	0.99	0.88	0.36	0.08	1	
1172920	1051880	0.00	0.48	0.58	0.01	1.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.46	0.03	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	1.00	0.70	0.63	0.20	0.43	0.85	0.00	0.98	0.88	0.36	0.45	1	
1171970	1050680	0.00	0.25	1.00	0.50	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.04	0.39	0.25	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	1.00	0.50	0.63	0.60	0.14	0.95	0.00	0.99	0.88	0.36	0.16	1	
1175120	1051601	0.00	0.32	0.96	0.30	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.46	0.00	0.18	0.07	0.28	0.00	0.06	0.38	0.70	1.00	0.20	0.13	0.94	0.00	0.99	0.88	0.36	0.15	1	
1173264	1053893	0.00	0.69	0.04	0.31	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.38	0.06	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	1.00	0.10	0.38	1.00	0.00	0.94	0.00	0.99	0.89	0.37	0.00	1	
1173640	1051650	0.00	0.51	0.47	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.42	0.08	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.13	0.70	1.00	0.20	0.46	0.85	0.00	1.00	0.89	0.37	0.44	1	
1173250	1051270	0.00	0.71	0.02	0.37	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.00	0.01	0.05	0.39	0.05	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.20	0.27	0.95	0.00	0.99	0.89	0.37	0.22	1	
1177872	1051422	0.00	0.81	0.03	0.68	1.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.10	0.51	0.05	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.12	0.94	0.00	0.98	0.89	0.37	0.12	1	
1172500	1051370	0.00	0.34	0.92	0.23	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.02	0.00	0.00	0.36	0.01	0.00	0.00	0.33	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	0.60	0.05	0.93	0.00	0.97	0.89	0.37	0.05	1	

3.2.4. Métodos de agregación

3.2.4.1. Función discriminante de susceptibilidad a deslizamientos

Es posible elaborar varios modelos a partir de diferentes combinaciones de variables. Un camino razonable es utilizar inicialmente todas las variables y generar un primer modelo para posteriormente valorar la exclusión de algunas de ellas en modelos posteriores. A continuación se describen los pasos para construir un primer modelo por este método.

Un paso preliminar es hacer un análisis de correlaciones. Con el propósito de remover variables redundantes (altamente correlacionadas) de los datos, se calcula la matriz de correlaciones que aparece en la Tabla 41. La matriz ofrece una visión de la interrelación entre las variables de entrada

Tabla 41. Matriz de correlaciones

	ACCA	SINA	COSA	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPBR	DPNE	DRIO	DVIA	DVNE	ESTR	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SE2P	SLOP	V50M
ACCA	1.00	0.00	0.09	0.03	-0.30	0.09	-0.20	0.07	0.05	-0.04	-0.03	0.02	-0.03	-0.04	-0.06	0.05	-0.04	-0.03	-0.03	0.01	-0.05	0.00	-0.03	0.69	-0.15	-0.07	-0.04	-0.01
SINA	0.00	1.00	-0.04	-0.19	0.05	-0.07	0.07	-0.09	-0.12	0.00	-0.03	0.02	0.02	0.00	-0.06	-0.09	0.00	-0.09	0.06	0.00	0.01	0.11	0.10	-0.05	0.05	-0.03	-0.06	0.12
COSA	0.09	-0.04	1.00	-0.06	0.04	-0.03	0.04	-0.09	-0.05	-0.14	0.03	0.06	0.01	0.07	-0.23	-0.05	0.07	-0.06	0.00	-0.04	0.13	0.05	0.01	-0.14	0.06	0.06	0.04	0.00
COBE	0.03	-0.19	-0.06	1.00	0.02	0.03	-0.01	0.30	0.24	-0.07	0.07	0.12	-0.15	-0.16	0.15	0.24	-0.17	0.15	-0.15	-0.14	0.28	-0.59	-0.11	0.14	0.04	0.14	0.16	-0.61
CRPL	-0.30	0.05	0.04	0.02	1.00	-0.53	0.82	-0.03	-0.02	-0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.02	0.01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.01	-0.01	0.08	-0.43	0.26	-0.01	-0.05	-0.01
CRPR	-0.09	-0.07	-0.03	0.03	-0.53	1.00	-0.92	0.05	0.05	0.09	-0.01	-0.03	-0.06	-0.07	0.01	0.05	-0.07	0.08	-0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.22	-0.22	-0.06	0.00	-0.04
CURV	-0.20	0.07	0.04	-0.01	0.82	-0.92	1.00	-0.05	-0.04	-0.07	0.01	0.03	0.04	0.05	-0.01	-0.04	0.05	-0.06	0.00	-0.05	-0.04	0.02	0.02	-0.35	0.27	0.04	-0.02	0.02
DACU	0.07	-0.09	-0.09	0.30	-0.03	0.05	-0.05	1.00	0.90	0.21	0.36	0.23	-0.08	-0.08	0.15	0.77	-0.08	0.18	-0.01	-0.15	0.16	-0.36	0.00	0.10	0.04	0.04	0.36	-0.36
DALC	0.05	-0.12	-0.05	0.24	-0.02	0.05	0.04	0.90	1.00	0.24	0.44	0.28	-0.08	-0.08	0.15	0.79	-0.08	0.18	-0.01	-0.12	0.16	-0.30	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01	-0.31
DDRE	-0.04	0.00	-0.14	-0.07	-0.03	0.09	-0.07	0.21	0.24	1.00	0.38	-0.03	-0.06	-0.07	0.26	0.08	-0.07	0.11	0.25	0.04	-0.36	0.22	0.03	-0.02	0.12	-0.09	-0.08	0.26
DEM	-0.03	-0.03	0.03	-0.07	0.01	-0.01	0.01	0.36	0.44	0.38	1.00	0.24	-0.04	-0.03	0.25	0.29	0.03	0.24	0.18	-0.07	-0.13	0.02	0.04	-0.03	0.07	-0.06	-0.06	0.04
DFAL	0.02	0.02	0.06	0.12	0.01	-0.03	0.03	0.23	0.28	-0.03	0.03	0.24	1.00	-0.08	-0.08	0.34	-0.08	0.26	-0.01	-0.08	0.23	-0.23	-0.04	0.12	-0.03	0.09	0.15	-0.21
DPBR	0.03	0.02	0.04	-0.15	0.00	-0.06	0.04	-0.08	-0.08	-0.06	-0.04	-0.08	1.00	0.95	0.05	0.04	0.95	-0.24	-0.05	0.07	-0.02	0.24	0.10	-0.01	0.03	-0.12	-0.10	0.23
DPNE	-0.04	0.00	0.07	-0.16	0.01	-0.07	0.05	-0.08	-0.08	-0.07	-0.03	-0.08	0.95	1.00	0.02	-0.04	1.00	-0.25	-0.05	0.06	-0.01	0.23	0.07	-0.02	0.02	-0.10	-0.08	0.21
DRIO	-0.06	0.06	-0.23	-0.15	-0.01	-0.01	0.01	0.05	0.15	0.26	0.25	-0.06	0.05	0.02	1.00	0.01	0.02	0.03	0.21	0.09	-0.24	0.22	0.12	0.03	0.08	-0.08	-0.07	0.24
DVIA	-0.05	-0.09	-0.05	0.24	-0.02	0.05	-0.04	0.77	0.79	0.08	0.29	0.34	-0.04	-0.04	0.01	1.00	-0.04	0.20	-0.06	-0.12	0.23	-0.28	-0.01	0.07	0.02	0.03	0.05	-0.28
DVNE	0.04	0.00	-0.07	-0.17	0.01	-0.07	0.05	-0.08	-0.08	-0.07	0.03	-0.08	0.95	1.00	0.02	-0.04	1.00	-0.25	-0.05	-0.07	-0.01	0.23	0.07	-0.02	0.02	-0.11	-0.09	0.21
ESTR	-0.03	-0.09	-0.06	0.15	0.00	-0.08	-0.06	0.18	0.18	0.11	0.24	0.26	-0.24	-0.25	0.03	0.20	-0.25	1.00	0.13	-0.18	0.04	-0.25	-0.07	0.07	0.02	0.04	0.05	-0.23
FMSU	-0.03	0.06	0.00	-0.15	-0.04	-0.03	0.00	-0.01	-0.01	0.25	-0.18	-0.01	-0.05	-0.05	0.21	-0.06	-0.05	-0.13	1.00	0.21	-0.27	0.24	0.08	0.02	0.07	-0.02	-0.06	0.25
GEOL	0.01	0.00	-0.04	-0.14	-0.04	0.04	-0.05	-0.15	-0.12	0.04	-0.07	-0.08	0.07	0.06	0.09	-0.12	0.07	-0.18	0.21	1.00	-0.11	0.25	0.06	0.03	0.11	-0.09	-0.10	0.25
GEOM	-0.05	0.01	0.13	0.28	0.01	0.06	-0.04	0.16	0.16	-0.36	-0.13	0.23	-0.02	-0.01	-0.24	0.23	-0.01	0.04	-0.27	-0.11	1.00	-0.43	0.00	0.00	0.04	0.16	0.12	-0.47
H50M	0.00	0.11	0.05	-0.59	-0.01	-0.04	0.02	-0.36	0.30	0.22	0.02	-0.23	0.24	0.23	-0.22	0.28	0.23	-0.25	0.24	0.25	-0.43	1.00	0.11	-0.08	0.01	-0.19	-0.20	0.99
INSO	-0.03	0.10	0.05	-0.11	0.08	0.03	0.02	0.00	0.05	0.03	0.04	-0.04	0.10	0.07	0.12	-0.01	0.07	-0.07	0.08	0.06	0.00	0.11	1.00	-0.06	0.17	-0.67	-0.76	0.12
LCCA	-0.09	-0.05	0.01	0.14	-0.03	0.22	-0.35	0.10	0.05	-0.02	0.03	0.12	-0.01	-0.02	0.03	0.07	-0.02	0.07	0.02	0.03	0.00	-0.08	-0.06	1.00	-0.08	-0.02	-0.05	-0.08
RUGO	-0.15	0.05	-0.14	0.04	0.26	-0.22	0.27	0.04	0.03	0.12	0.07	-0.03	0.03	0.02	0.08	0.02	0.02	0.02	0.07	0.11	0.04	0.01	-0.17	-0.02	1.00	-0.10	-0.14	-0.02
SE2P	-0.07	-0.03	0.06	0.14	-0.01	-0.06	0.04	0.04	0.01	-0.09	-0.06	0.09	-0.12	-0.10	-0.08	0.03	-0.11	0.04	-0.02	-0.09	0.16	-0.19	0.67	-0.02	1.00	0.88	-0.20	0.20
SLOP	-0.04	-0.06	0.06	0.16	-0.05	0.00	-0.02	0.04	0.01	-0.08	-0.06	0.15	-0.10	-0.08	-0.07	0.05	-0.09	0.05	-0.06	-0.10	0.12	-0.20	-0.76	0.05	-0.14	0.88	1.00	-0.21
V50M	0.01	0.12	0.04	-0.61	-0.01	-0.04	0.02	-0.36	-0.31	0.26	0.04	-0.21	0.23	0.21	-0.24	-0.28	0.21	-0.23	0.25	0.25	-0.47	0.99	0.12	-0.08	0.02	-0.20	-0.21	1.00

Como puede notarse, existen algunos factores que presentan altas correlaciones; en este caso debe analizarse por pares qué variable es conveniente conservar y cual debe descartarse. Las variables con más fuerte correlación se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Variables con correlaciones altas

Variable		Correlación
acca	lcca	0.69
cobe	h50m	-0.59
cobe	v50m	-0.61
crpl	crpr	-0.53
crpl	curv	0.82
crpr	curv	-0.92
dacu	dalc	0.90
dacu	dvía	0.77
dalc	dvía	0.79
dpbr	dpne	0.95
dpbr	dvne	0.95
dpne	dvne	1.00
h50m	v50m	0.99
inso	se2p	-0.67
inso	slop	-0.76
se2p	slop	0.88

El test de igualdad de medias entre grupos mide el potencial de cada variable independiente antes de que el modelo sea creado. Cada test muestra el resultado de un análisis one-way ANOVA para la variable independiente usando la variable de agrupación como factor. Si el valor de significancia es mayor a 0.10, la variable probablemente no contribuye al modelo. Los valores Lambda de Wilks son otra medida del potencial de la variable. Valores pequeños indican que la variable es mejor discriminando entre grupos. Los valores de Lambda de Wilks y el F de Fisher para cada variable se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. Test de igualdad de medias entre grupos

	Wilks' Lambda	F	Sig.
DVIA	0.819	143.960	0.00000
DALC	0.846	118.540	0.00000
SE2P	0.847	118.197	0.00000
DACU	0.871	96.738	0.00000
SLOP	0.883	86.774	0.00000
COBE	0.922	54.828	0.00000
ESTR	0.925	53.227	0.00000
H50M	0.929	49.961	0.00000
V50M	0.930	48.801	0.00000
DDRE	0.938	43.313	0.00000
DEM	0.949	34.761	0.00000
INSO	0.956	29.835	0.00000
DFAL	0.984	10.666	0.00115
SINA	0.988	8.132	0.00449
RUGO	0.993	4.848	0.02803
GEOM	0.994	4.126	0.04265
LCCA	0.994	4.051	0.04456
COSA	0.994	3.871	0.04956
DRIO	0.994	3.731	0.05385
ACCA	0.997	2.170	0.14118
CRPR	0.998	1.035	0.30926
FMSU	0.999	0.503	0.47830
CRPL	0.999	0.482	0.48756
GEOL	0.999	0.349	0.55508
DPBR	1.000	0.276	0.59937
CURV	1.000	0.105	0.74652
DVNE	1.000	0.024	0.87605
DPNE	1.000	0.011	0.91484

La Figura 104 muestra el test F llevado a cabo a los datos de entrada. Puede notarse de izquierda a derecha la importancia relativa de cada variable dentro del modelo. En el eje derecho se lee la significancia estadística, que a partir de 0.10 refleja que la variable en cuestión no aporta estadísticamente al modelo.

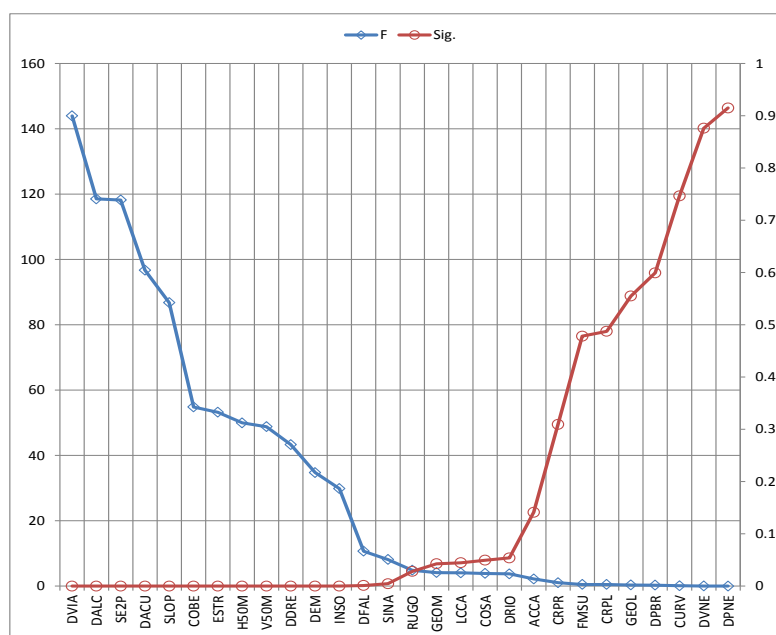


Figura 104. Test F para el modelo por Análisis Discriminante

El análisis de varianza lleva a descartar las variables *dpne*, *dvne*, *curv*, *dpbr*, *geol*, *crpl*, *fmsu*, *crpr*, *acca*, *drio*, *cosa*, *lcca*, *geom* y *rugo*, dado su bajo poder discriminante.

La correlación de los predictores o colinealidad se evalúa usando la matriz de covarianza entre grupos (Tabla 44). Una inspección de la correlación de las covarianzas muestra en general, valores aceptables.

Tabla 44. Correlación de covarianzas

	SINA	COSA	COBE	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DRIO	DVIA	ESTR	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SE2P	SLOP	V50M
SINA	0.123	-0.002	0.002	-0.004	-0.003	-0.005	-0.004	0.005	-0.007	0.001	-0.001	-0.005	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.004	-0.002	0.000
COSA	-0.002	0.116	0.000	-0.003	-0.004	-0.002	0.000	-0.005	-0.003	-0.006	-0.004	-0.010	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
COBE	0.002	0.000	0.066	0.008	0.011	0.002	0.003	0.001	-0.001	0.008	0.029	0.034	-0.021	-0.003	0.000	0.000	0.008	0.005	-0.023
DACU	-0.004	-0.003	0.008	0.016	0.017	0.011	0.009	0.001	0.010	0.009	0.009	0.008	-0.004	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.004
DALC	-0.003	-0.004	0.011	0.017	0.025	0.015	0.012	0.001	0.013	0.014	0.013	0.011	-0.006	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.006
DDRE	-0.005	-0.002	0.002	0.011	0.015	0.014	0.009	0.000	0.010	0.005	0.004	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.001	-0.001
DEM	-0.004	0.000	0.003	0.009	0.012	0.009	0.014	0.003	0.008	0.005	0.006	0.000	-0.002	0.001	0.000	0.000	-0.004	-0.002	-0.002
DFAL	0.005	-0.005	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003	0.009	0.001	0.003	0.003	0.005	-0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001
DRIO	-0.007	-0.003	-0.001	0.010	0.013	0.010	0.008	0.001	0.023	0.006	-0.002	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.002	-0.001	0.000
DVIA	0.001	-0.006	0.008	0.009	0.014	0.005	0.005	0.003	0.006	0.013	0.010	0.014	-0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.005
ESTR	-0.001	-0.004	0.029	0.009	0.013	0.004	0.006	0.003	-0.002	0.010	0.093	0.023	-0.021	-0.001	0.000	0.000	0.003	0.002	-0.022
GEOM	-0.005	-0.010	0.034	0.008	0.011	0.000	0.000	0.005	0.005	0.014	0.023	0.105	-0.019	-0.002	0.000	0.000	0.014	0.008	-0.021
H50M	0.000	0.000	-0.021	-0.004	-0.006	-0.001	-0.002	-0.001	0.000	-0.005	-0.021	-0.019	0.015	0.002	0.000	0.000	-0.007	-0.004	0.016
INSO	-0.001	0.001	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	-0.001	-0.002	0.002	0.004	0.000	0.000	-0.009	-0.006	0.002
LCCA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RUGO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
SE2P	-0.004	0.002	0.008	-0.001	-0.001	-0.002	-0.004	-0.001	-0.002	0.000	0.003	0.014	-0.007	-0.009	0.000	0.000	0.038	0.022	-0.008
SLOP	-0.002	0.001	0.005	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	0.000	0.002	0.008	-0.004	-0.006	0.000	0.000	0.022	0.015	-0.004
V50M	0.000	0.001	-0.023	-0.004	-0.006	-0.001	-0.002	-0.001	0.000	-0.005	-0.022	-0.021	0.016	0.002	0.000	0.000	-0.008	-0.004	0.017

El test Box's M es utilizado para probar la homogeneidad de las matrices de covarianza, chequea el supuesto de igualdad de covarianzas entre grupos. Los log determinantes (Tabla 45) son una medida de la variabilidad de los grupos. Valores altos corresponden a grupos más variables. Diferencias grandes en los valores indican que los grupos tienen diferentes matrices de covarianza.

Tabla 45. Chequeo de homogeneidad de covarianzas

DESL	Rank	Log Determinant
0	19	-92.46878264
1	19	-104.3172622
Pooled within-groups	19	-93.93410466

Cuando el valor Box's M (Tabla 46) es significativo (Sig.=0), se debe chequear el modelo discriminante mediante matrices separadas para verificar si se obtienen valores de clasificación diferentes. En este caso, los modelos con matrices separadas produjeron resultados de clasificación muy similares o en algunos casos inferiores a los obtenidos con un solo grupo.

Tabla 46. Test Box M

Box's M		2907.214
F	Approx.	14.84244
	df1	190
	df2	1301806
	Sig.	0

El Lambda de Wilks (Tabla 47) es una medida de la manera en que cada función separa los casos en grupos. Es igual a la proporción de varianza total en los coeficientes discriminantes no explicada por diferencias entre los grupos. Pequeños valores de lambda indican gran poder discriminante de la función. El Chi-cuadrado asociado chequea la hipótesis de que las medias de las funciones son iguales entre grupos. Valores pequeños de Sig. Indican que la función discriminante tiene resultados mejores que el azar en la separación entre grupos.

Tabla 47. Lambda de Wilks para el modelo general

Wilks' Lambda				
Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
1	0.648	278.405	19	5.21E-48

La tabla de valores propios (Tabla 48) proporciona información sobre la eficacia de la función discriminante. Cuando existen dos grupos, la correlación canónica es la medida más útil en la tabla, y es equivalente a la correlación de Pearson entre los coeficientes discriminantes y los grupos.

Tabla 48. Valores propios y correlación para la función discriminante

Eigenvalues				
Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	0.542	100	100	0.593

Hay varias tablas que evalúan la contribución de cada variable al modelo, incluyendo los tests de igualdad de medias grupales, los coeficientes de la función discriminante y la matriz de estructura.

La matriz de estructura (Tabla 49) muestra la correlación de cada predictor con la función discriminante y constituye una prueba de la importancia que cada variable tiene dentro del modelo. El orden en esta matriz es igual al sugerido por el test de igualdad de medias grupales y es diferente del que aparece en la tabla de coeficientes estandarizados que constituye la ecuación del modelo lineal.

Tabla 49. Matriz de estructura del modelo

DVIA	-0.638
DALC	-0.579
SE2P	0.578
DACU	-0.523
SLOP	0.495
COBE	-0.394
ESTR	-0.388
H50M	0.376
V50M	0.371
DDRE	-0.350
DEM	-0.314
INSO	-0.290
DFAL	-0.174
SINA	0.152
RUGO	-0.117
GEOM	-0.108
LCCA	-0.107
COSA	0.105
DRIO	-0.103

Los coeficientes estandarizados (Tabla 50) permiten comparar variables medidas en diferentes escalas. Coeficientes con valores absolutos altos corresponden a variables con alto poder discriminante. Puede observarse que dentro de las variables más influyentes individualmente se encuentran *dpob*, *dem*, *dvia*, *slope* y *drío*.

Tabla 50. Coeficientes canónicos estandarizados

SINA	0.145
COSA	-0.021
COBE	-0.172
DACU	-0.131
DALC	-0.027
DDRE	-0.087
DEM	0.141
DFAL	-0.021
DRIO	0.060
DVIA	-0.455
ESTR	-0.171
GEOM	0.125
H50M	0.248
INSO	0.156
LCCA	-0.029
RUGO	-0.077
SE2P	0.621
SLOP	0.158
V50M	0.011

El modelo lineal obtenido con la función discriminante se ensambla con los coeficientes canónicos de la Tabla 51.

Tabla 51. Coeficientes de la función discriminante

SINA	0.399
COSA	-0.064
COBE	-0.575
DACU	-1.426
DALC	-0.229
DDRE	-1.003
DEM	1.550
DFAL	-0.237
DRIO	0.389
DVIA	-5.219
ESTR	-0.445
GEOM	0.369
H50M	1.885
INSO	2.358
LCCA	-3.133
RUGO	-3.192
SE2P	3.952
SLOP	1.437
V50M	0.083
(Constant)	-2.870

La Tabla 52 resume los resultados del modelo inicial en cuanto a capacidad de clasificación de casos. Puede leerse que el modelo acierta en la clasificación del 70% de las celdas estables, clasifica correctamente el 85% de las celdas inestables, y en total, tiene un acierto del 78% de casos.

Tabla 52. Resultados de clasificación del modelo inicial

	DESL	Resultados de la clasificación		
		0	1	Total
Count	0	231	96	327
	1	48	279	327
%	0	70.6422	29.3578	100
	1	14.6789	85.3211	100

La ecuación lineal obtenida se ha aplicado a toda el área bajo estudio y sus valores se han normalizado entre 0 y 1. Este procedimiento hace que la asignación posterior de categorías de susceptibilidad sea más sencillo. El mapa resultado de esta clasificación se presenta a continuación (Figura 105). Se trata de un mapa ráster con valores entre cero y uno que refleja el grado relativo de susceptibilidad de cada celda del terreno.

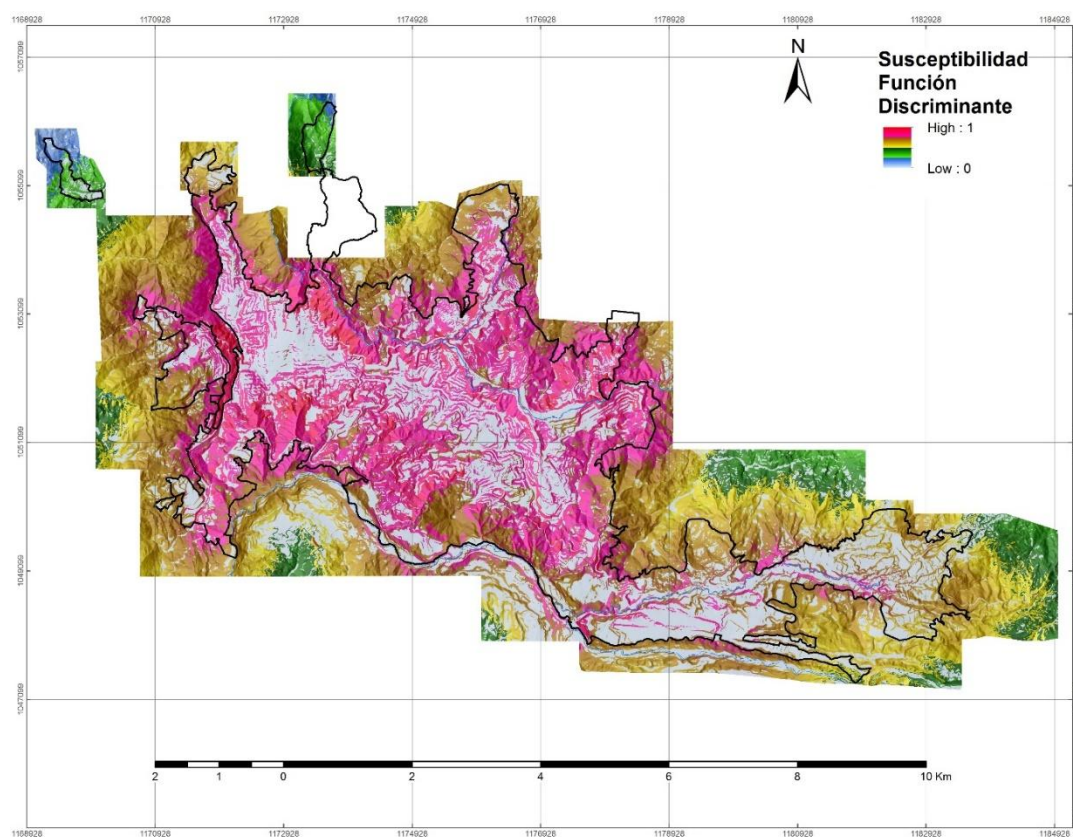
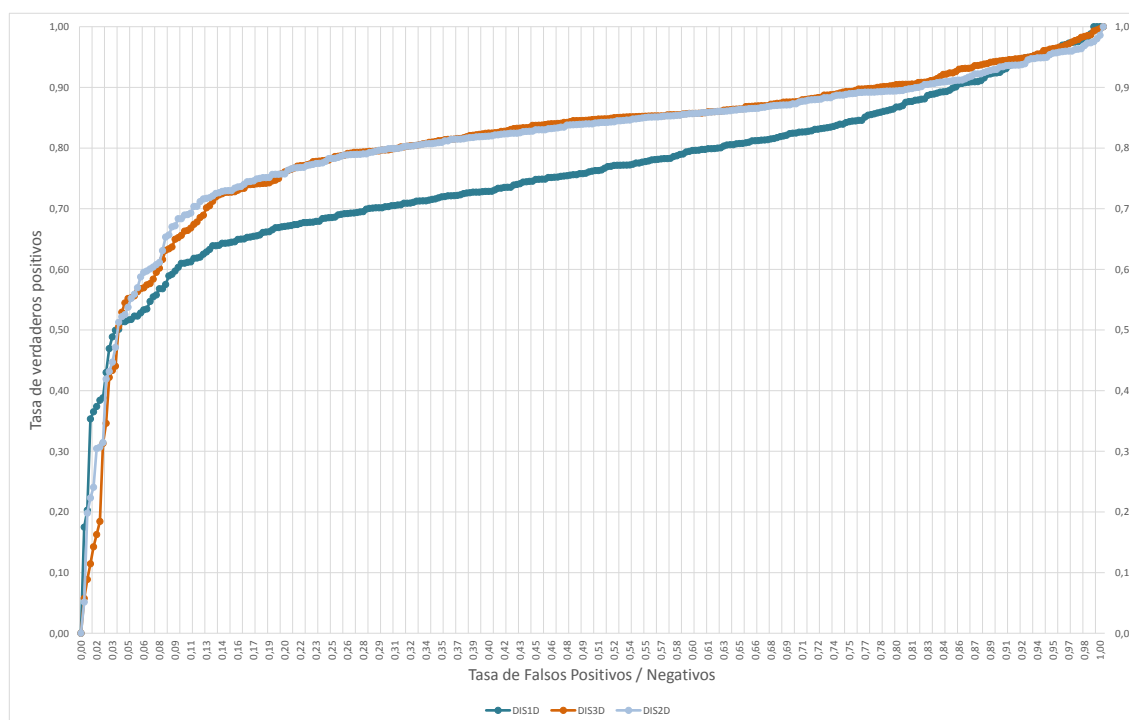


Figura 105. Mapa de susceptibilidad por el método multivariado de Análisis Discriminante

Se han probado diferentes modelos. Los tres que mejores resultados de clasificación producen pueden verse en la Tabla 53 y sus gráficos asociados a la clasificación de áreas inestables en la Figura 106; de ellas se desprende que el modelo más eficiente es el DIS2.

Tabla 53. Parámetros de rendimiento de los modelos probados

	DIS1	DIS2	DIS3
fp	12	12	12
tp	315	315	315
tn	24	31	39
fn	303	296	288
AUC_D	0,76	0,81	0,81
AUC_E	0,73	0,76	0,74
SENSIBILIDAD	0,96	0,96	0,96
ESPECIFICIDAD	0,07	0,12	0,09
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,52	0,54	0,53
SENSIBILIDAD	0,96	0,96	0,96
ESPECIFICIDAD	0,93	0,91	0,88
GILBERT SCORE	0,50	0,51	0,51
PEIRCE SKILL SCORE	-0,84	-0,82	-0,80
HEIDKE SKILL SCORE	0,04	0,06	0,08
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,35	0,47	0,56


Figura 106. Curvas de rendimiento para modelos discriminantes

3.2.4.1.1. Análisis De Componentes Principales

Un resultado adicional que puede obtenerse es el Análisis de Componentes Principales (Figura 107) de las variables involucradas, el cual ofrece una visión de las variables más relevantes divididas en componentes principales (CP). De esta manera, el CP1 tiene mayor importancia y dentro de él las variables Distancia a la red de acueductos (dacu) y Distancia a la red de alcantarillados (dalc) tienen mayor peso y relación directa con la susceptibilidad, mientras que las variables de densidad de habitantes y viviendas en 50 metros (v50m, h50m) tienen mayor peso y relación inversa. En el CP2 las variables más relevantes son las relacionadas con la pendiente (slop y se2p). De manera similar pueden leerse los demás componentes, los cuales van teniendo menor influencia. En la Tabla 54 se presenta la varianza explicada por cada uno de los componentes

principales obtenidos, y el total acumulado; el CP1 explicaría un 22% de la varianza de los datos, y los 6 componentes juntos explicarían el 67%.

Tabla 54. Varianza explicada por los componentes principales

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	4.13	21.73	21.73	4.13	21.73	21.73
2	2.92	15.38	37.11	2.92	15.38	37.11
3	2.14	11.27	48.39	2.14	11.27	48.39
4	1.34	7.04	55.43	1.34	7.04	55.43
5	1.15	6.06	61.49	1.15	6.06	61.49
6	1.10	5.81	67.30	1.10	5.81	67.30
7	0.99	5.22	72.52			
8	0.87	4.60	77.11			
9	0.85	4.48	81.59			
10	0.73	3.87	85.46			
11	0.62	3.26	88.72			
12	0.54	2.83	91.55			
13	0.50	2.62	94.17			
14	0.42	2.22	96.39			
15	0.30	1.55	97.94			
16	0.20	1.06	99.00			
17	0.10	0.50	99.50			
18	0.09	0.46	99.96			
19	0.01	0.04	100.00			

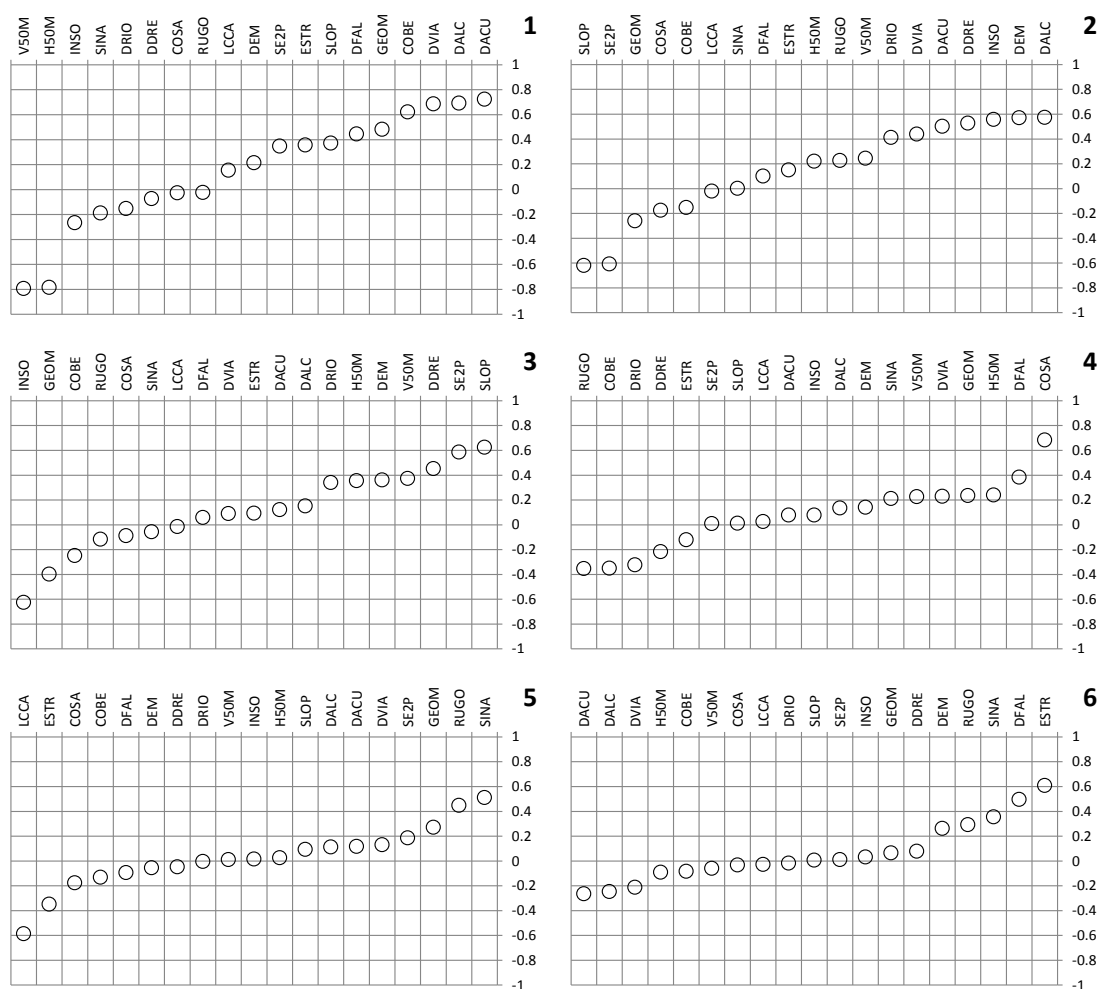
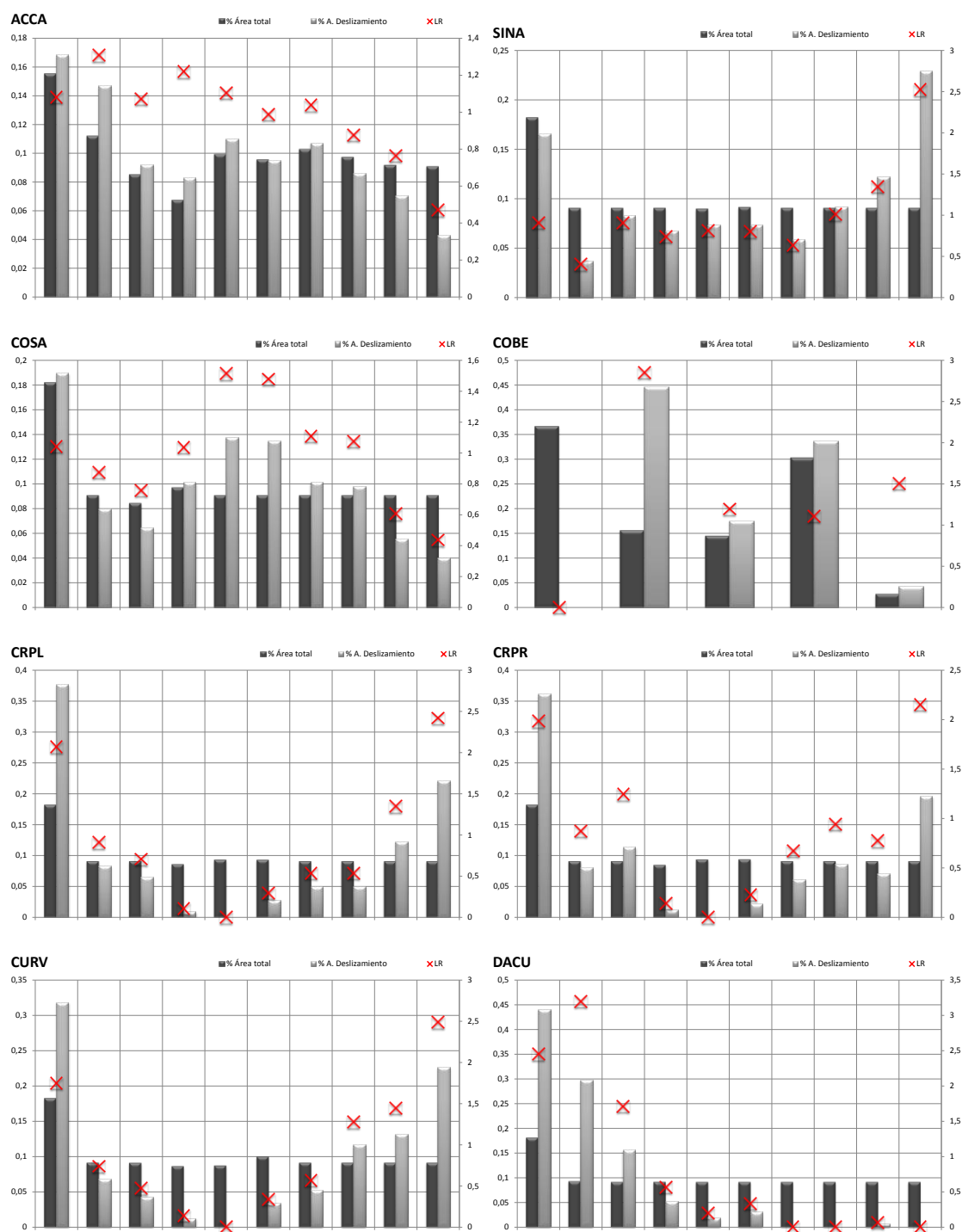


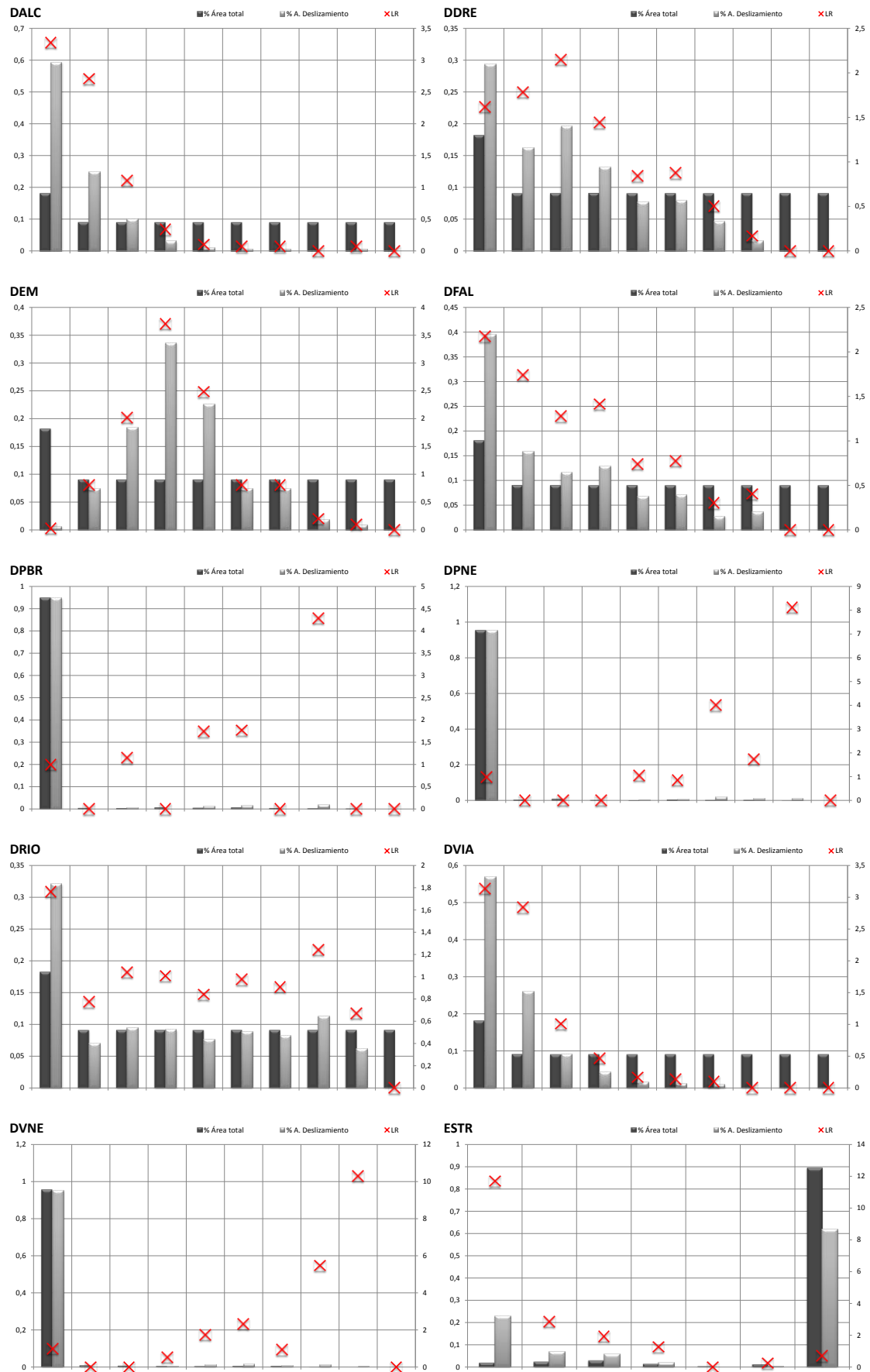
Figura 107. Análisis de Componentes Principales

Dado que para explicar el 67% de la varianza de los datos se utilizan los 6 componentes principales descritos, no es posible descomponer los datos en subíndices o simplificaciones, y las interpretaciones derivadas deben tomarse sólo de manera indicativa.

3.2.4.2. Método De Funciones De Favorabilidad

En la Figura 108 se presentan los valores de frecuencia relativa para el área con deslizamientos (gris claro) y para el área restante (gris oscuro) en el eje de la derecha, así como la relación de frecuencias para cada clase de cada uno de los factores (rojo) en el eje de la izquierda.





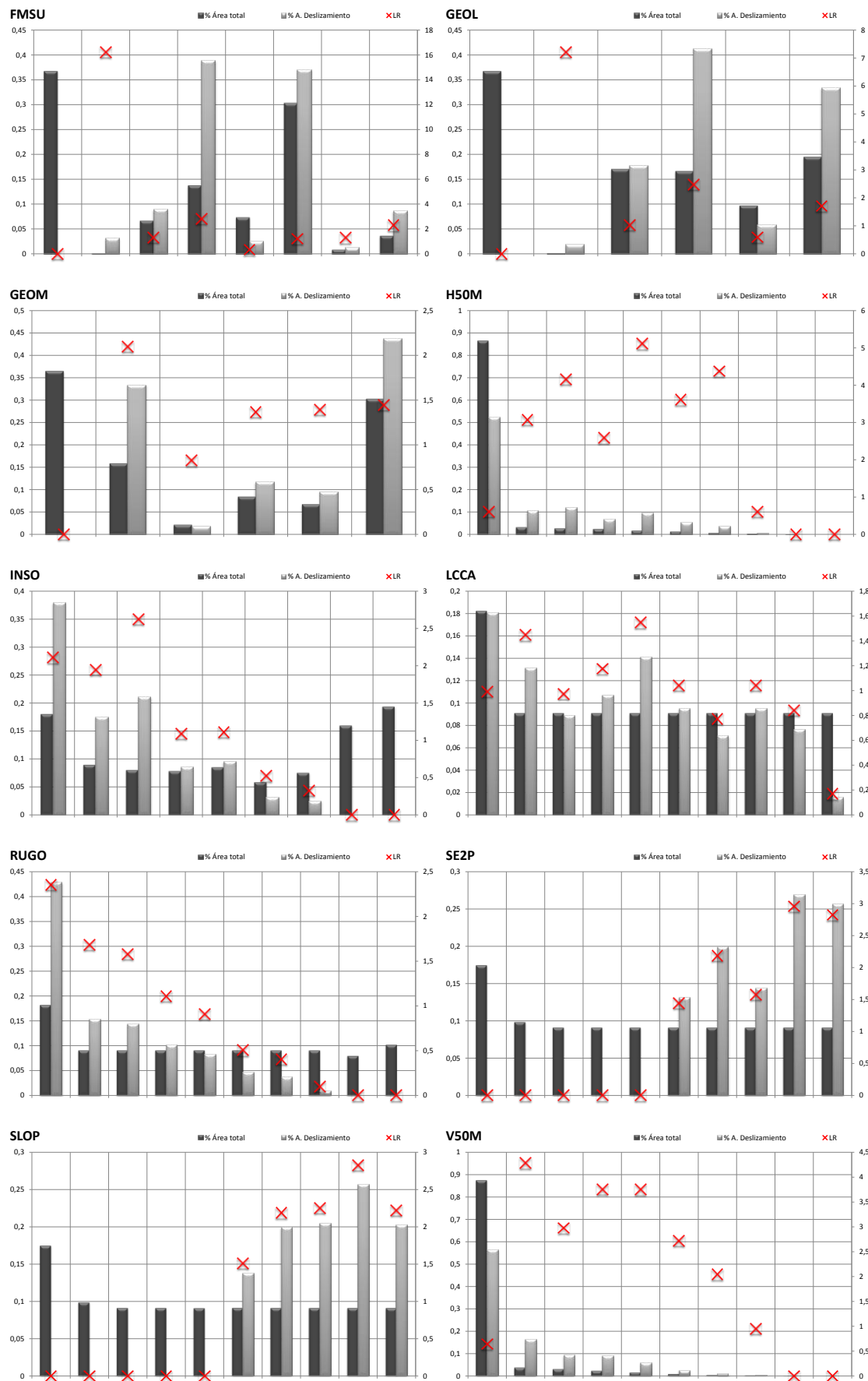


Figura 108. Frecuencia relativa para el área con deslizamientos (gris claro), para el área restante (gris oscuro), y relación de frecuencias para cada clase de cada uno de los factores (rojo)

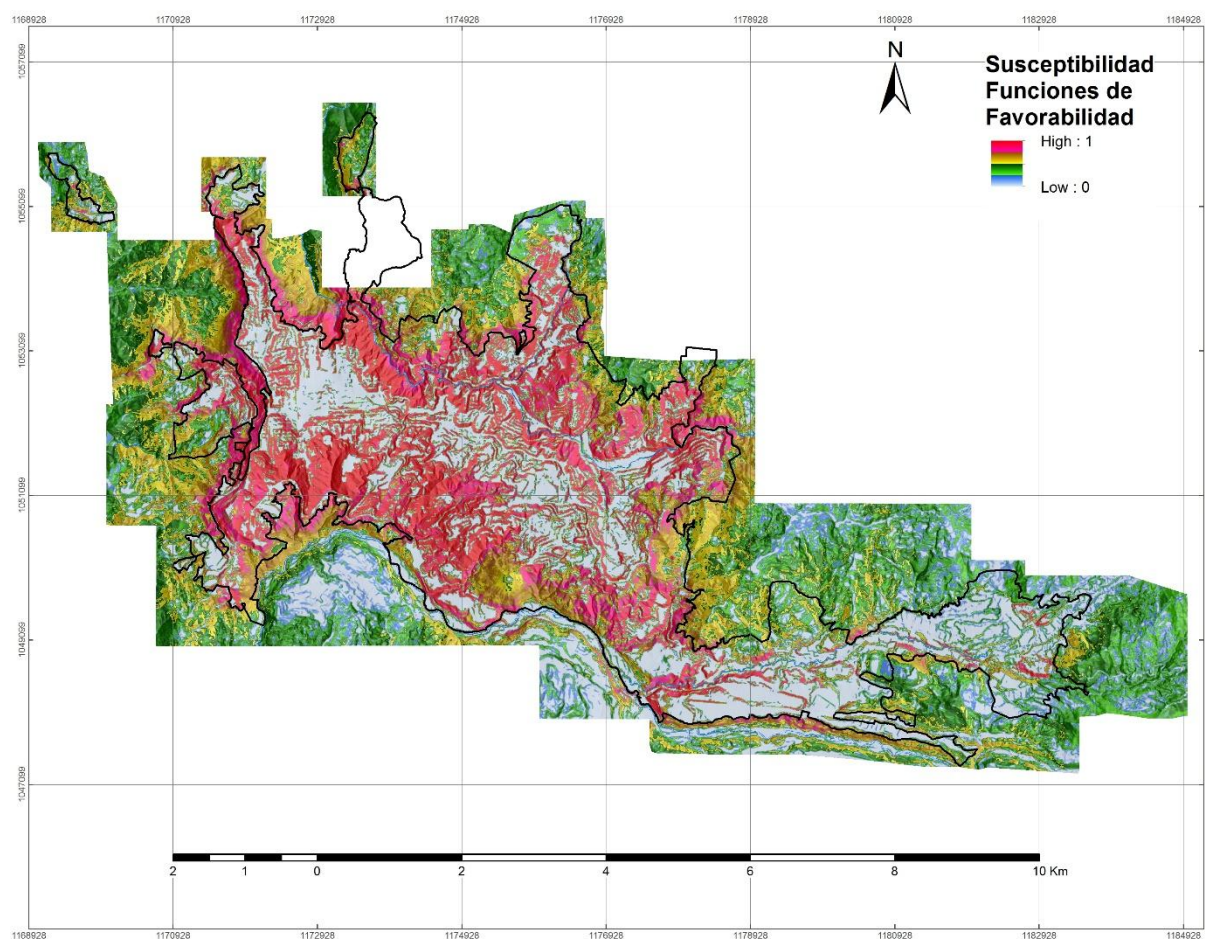


Figura 109. Mapa de Susceptibilidad mediante relación de frecuencias

En este caso los modelos son muy similares en cuanto a su rendimiento, con una ligera ventaja del segundo, como puede comprobarse en la Tabla 55 y la Figura 110.

Tabla 55. Parámetros de rendimiento modelos de relación de frecuencias

	RF01	RF02
fp	134	135
tp	193	192
tn	251	250
fn	76	77
AUC_D	0,570	0,574
AUC_E	0,357	0,357
SENSIBILIDAD	0,590	0,587
ESPECIFICIDAD	0,768	0,765
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,679	0,676
SENSIBILIDAD	0,590	0,587
ESPECIFICIDAD	0,232	0,235
GILBERT SCORE	0,479	0,475
PEIRCE SKILL SCORE	-0,225	-0,228
HEIDKE SKILL SCORE	0,358	0,352
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,653	0,644

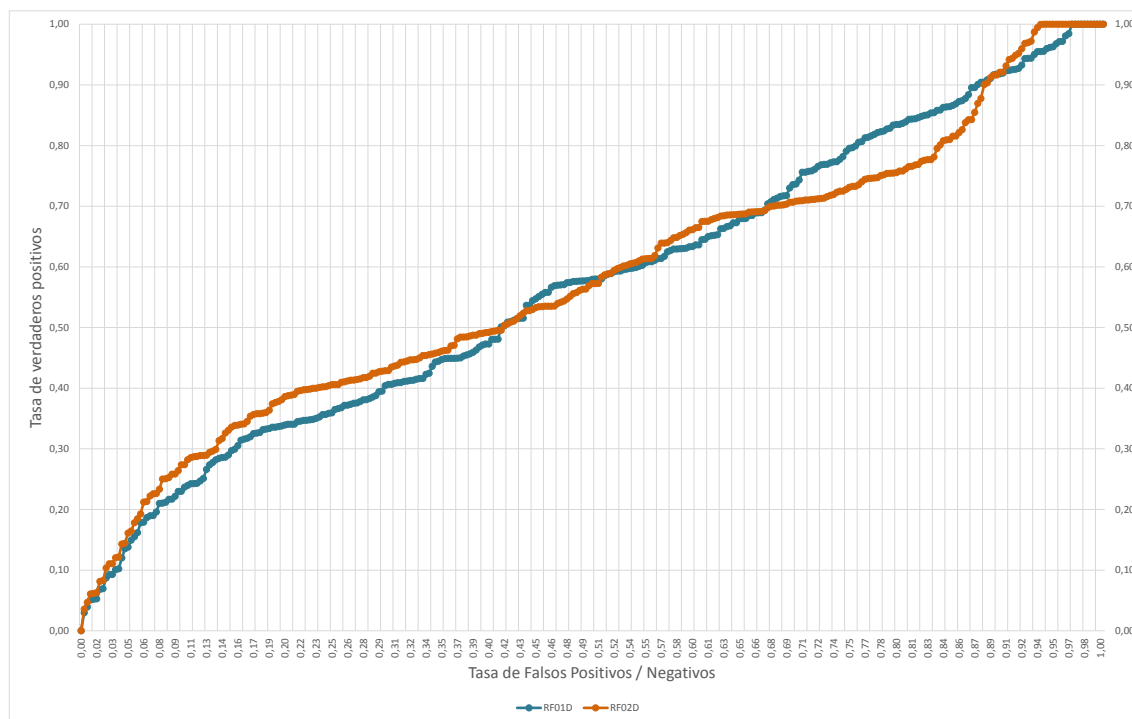
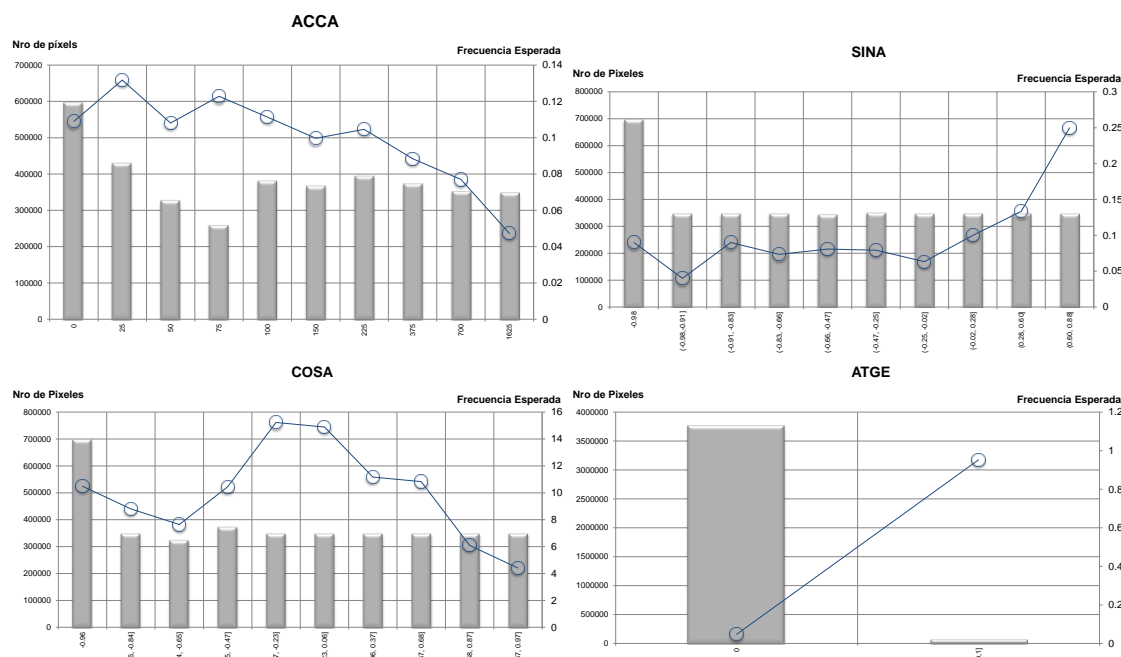
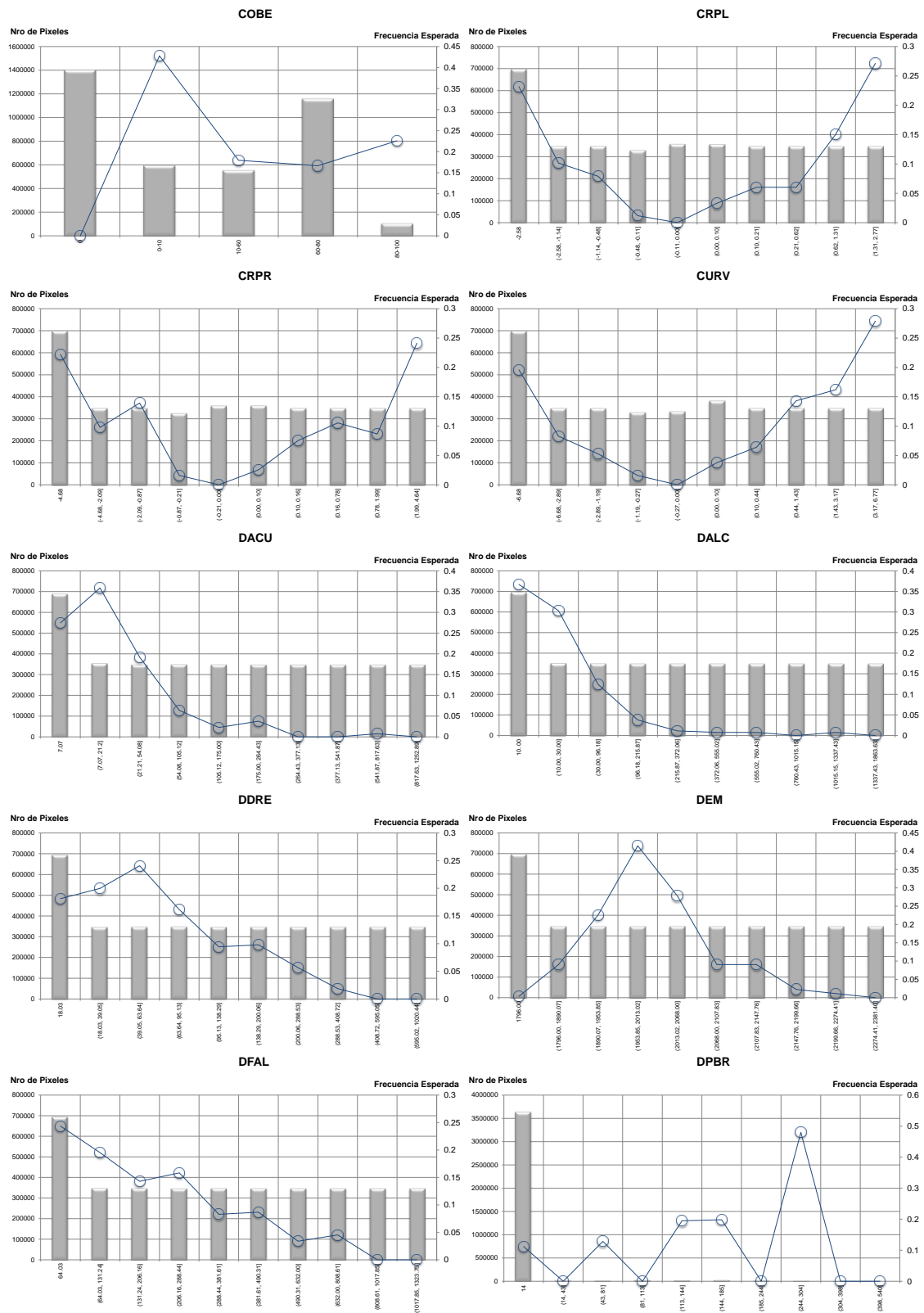


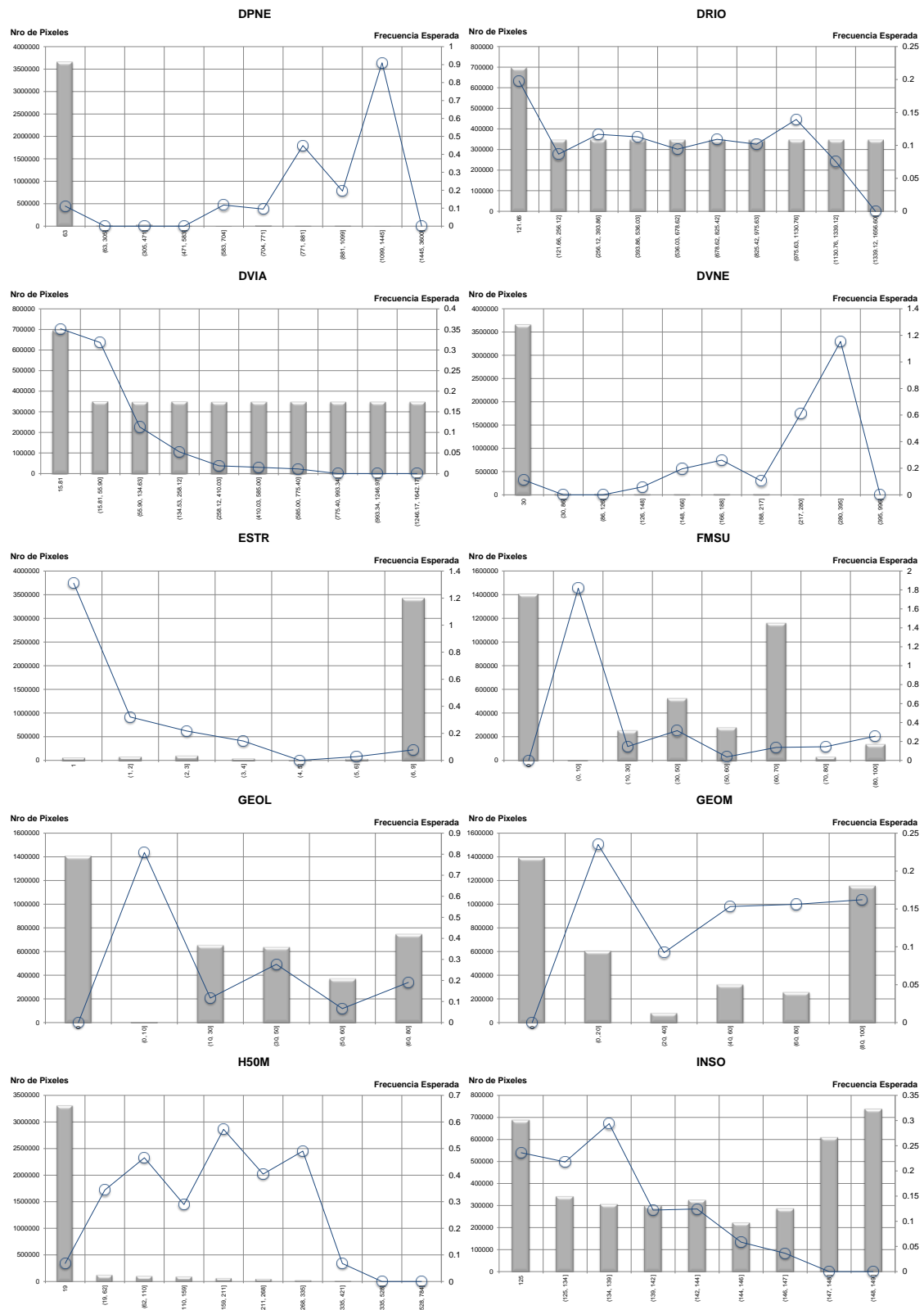
Figura 110. Curvas de rendimiento para los modelos por relación de frecuencias

3.2.4.3. Método De Números Difusos

En la Figura 111 se presentan los valores de frecuencia relativa escalada F correspondiente a cada variable, al igual que el número de píxeles total por cada clase.







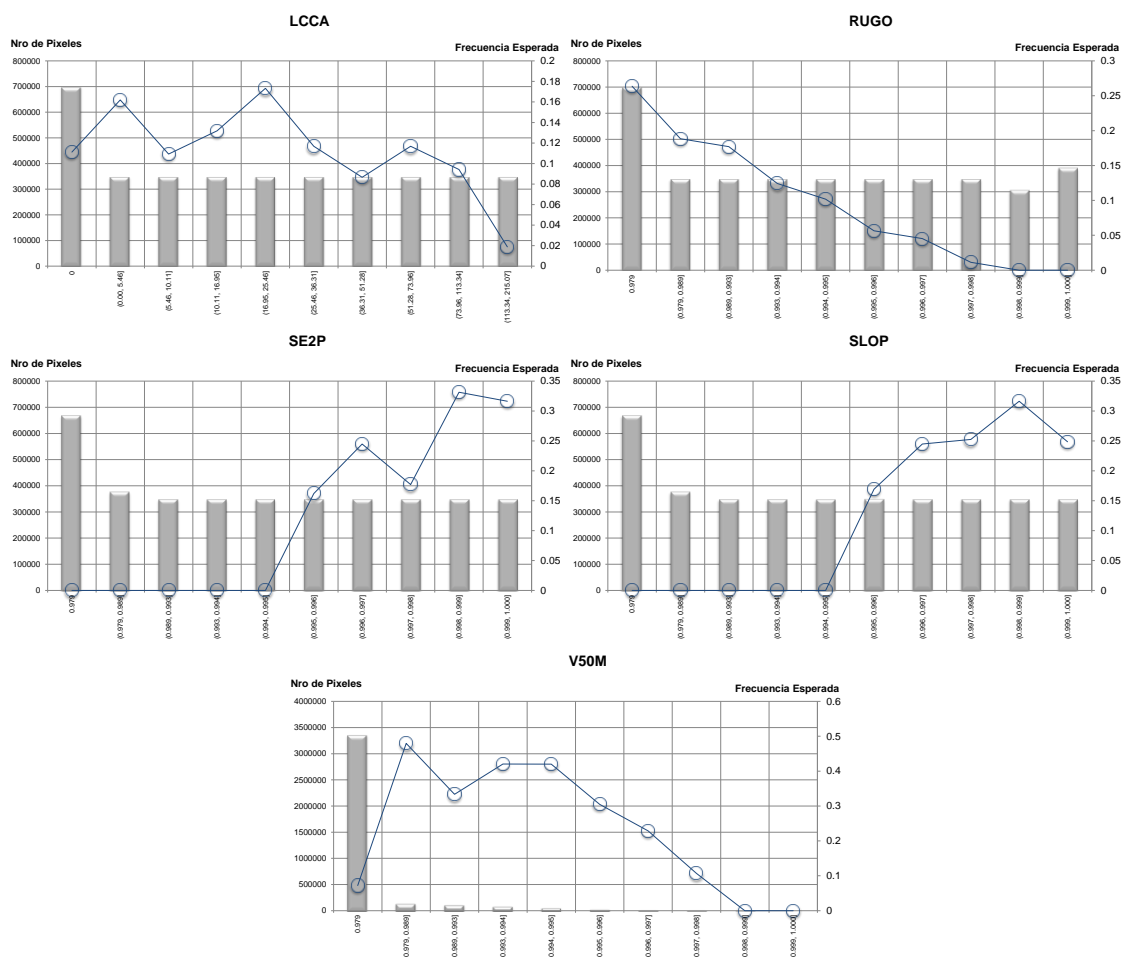
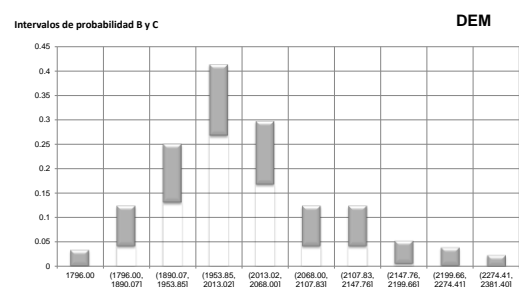
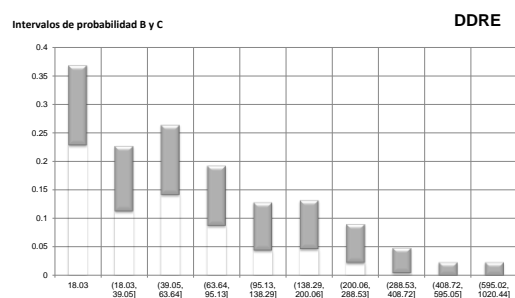
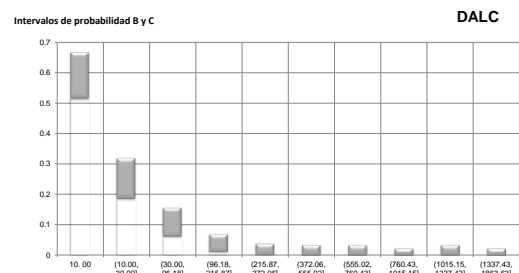
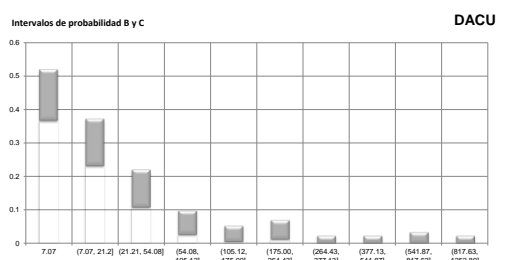
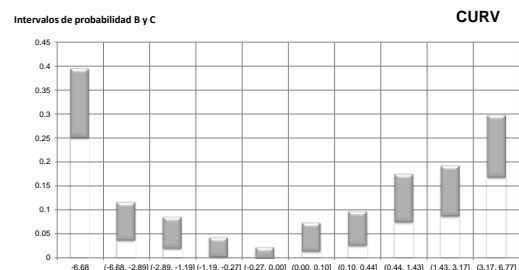
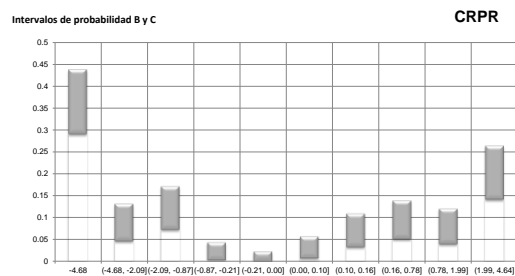
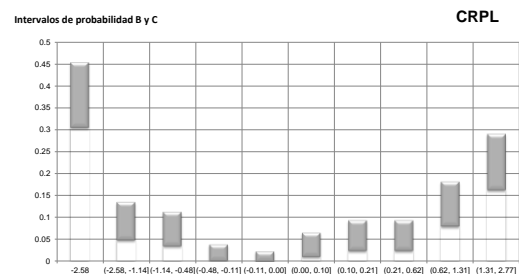
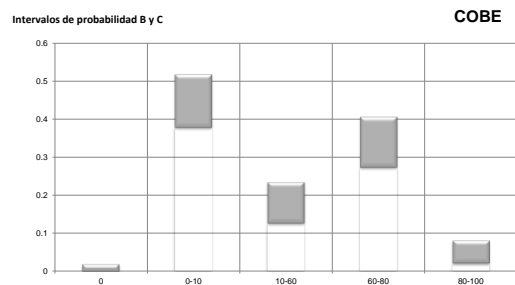
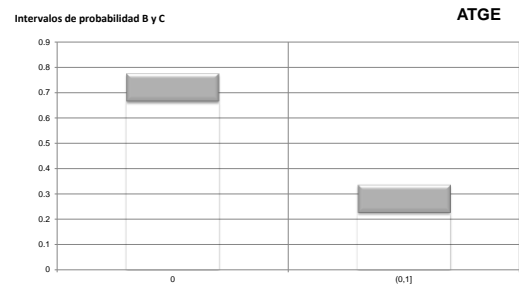
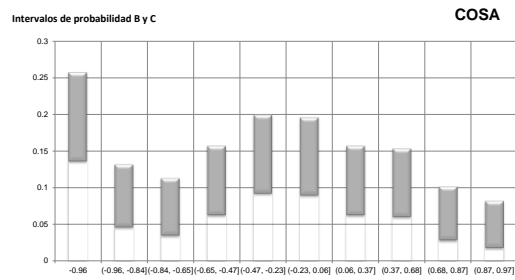
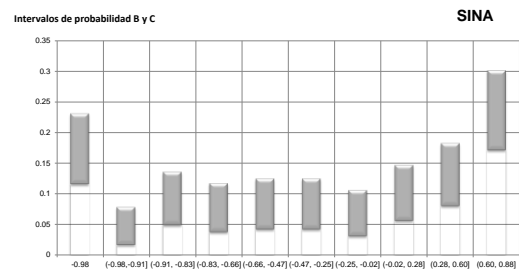
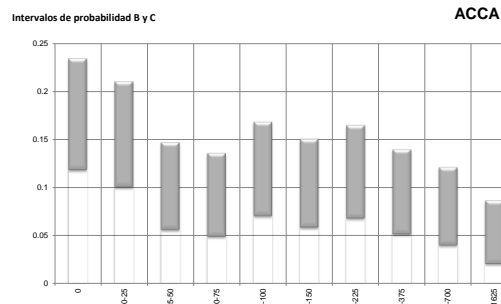
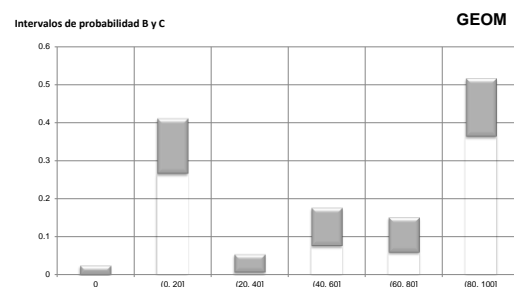
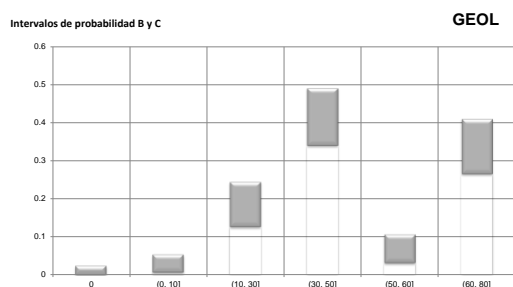
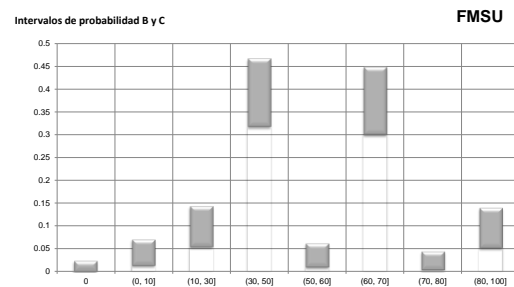
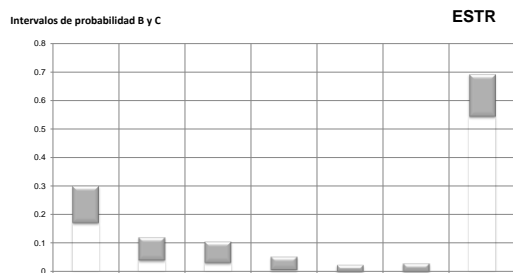
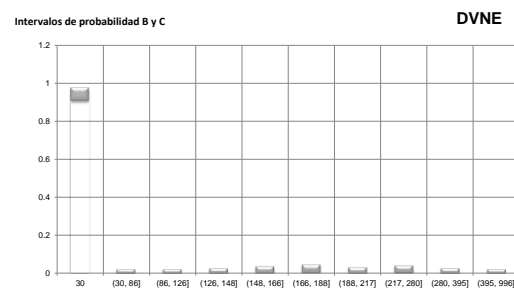
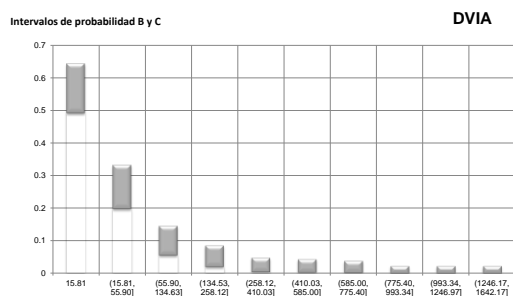
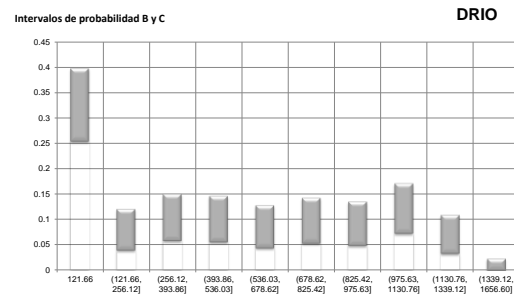
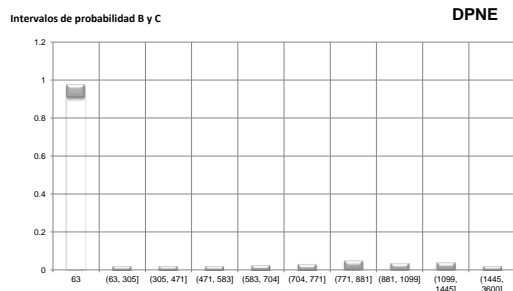
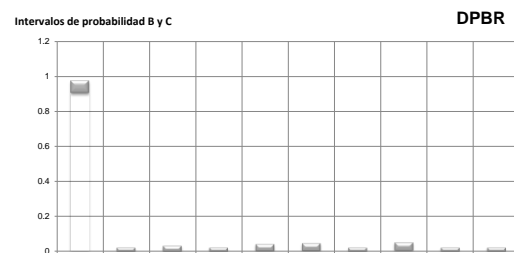
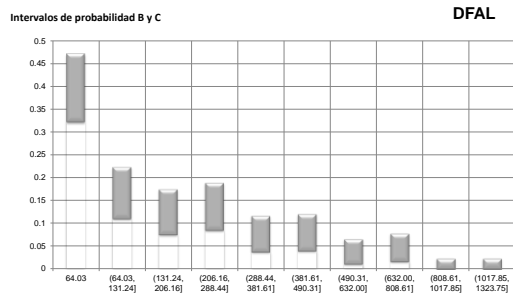


Figura 111. Frecuencia relativa escalada F correspondiente a cada variable y número de pixeles total por cada clase

Los intervalos de probabilidad obtenidos según la formulación de Goodman (Goodman 1965), permiten la construcción de números difusos trapezoidales para cada clase de cada variable.

En la Figura 112 se presentan los intervalos más creíbles, evaluados en el punto $\alpha_{(x)} = 1$ de los números difusos asociados a cada uno de los factores involucrados en el análisis:





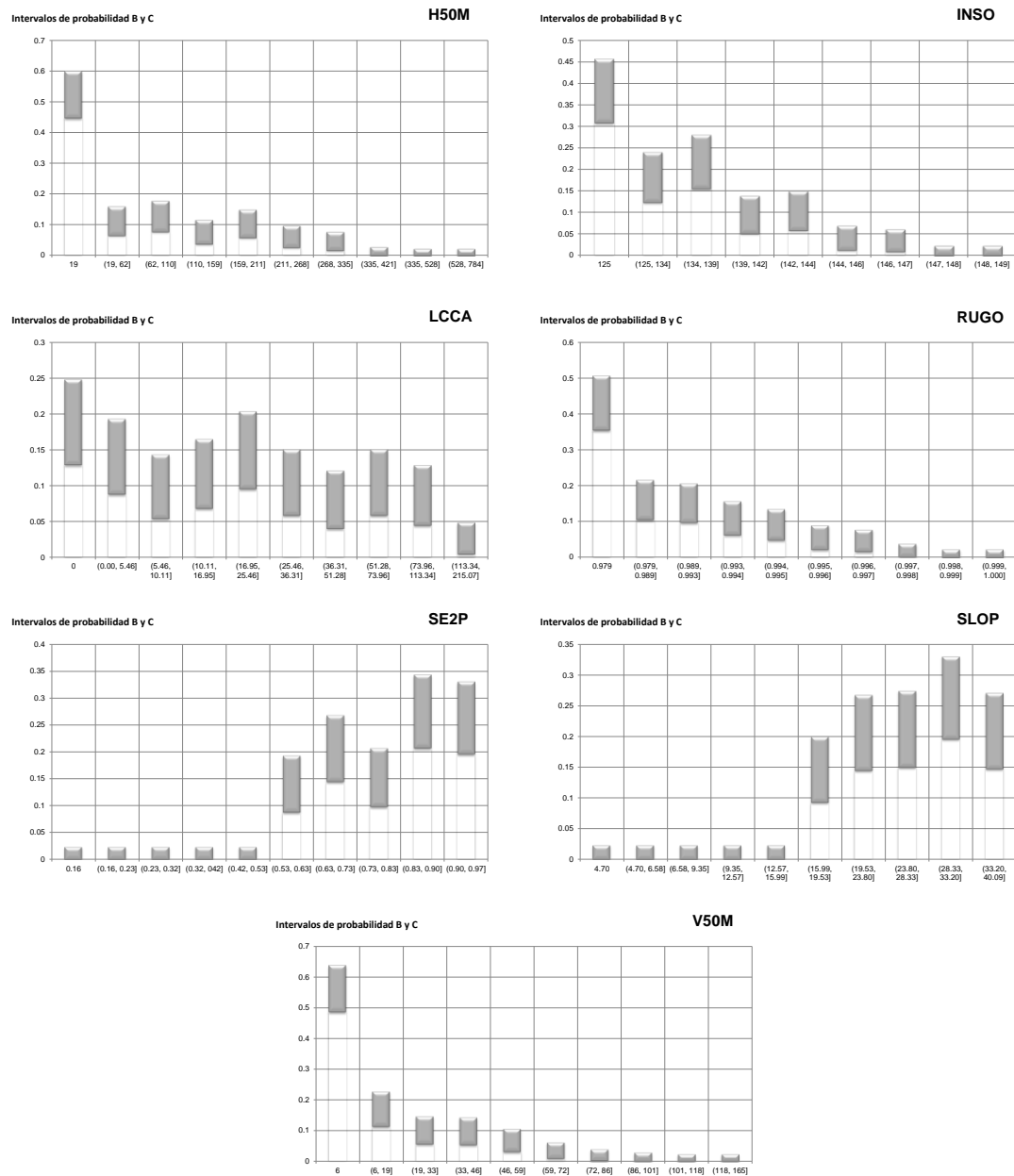


Figura 112. Intervalos de confianza evaluados en el punto central $\alpha(x)=1$ de los números difusos asociados a cada uno de los factores

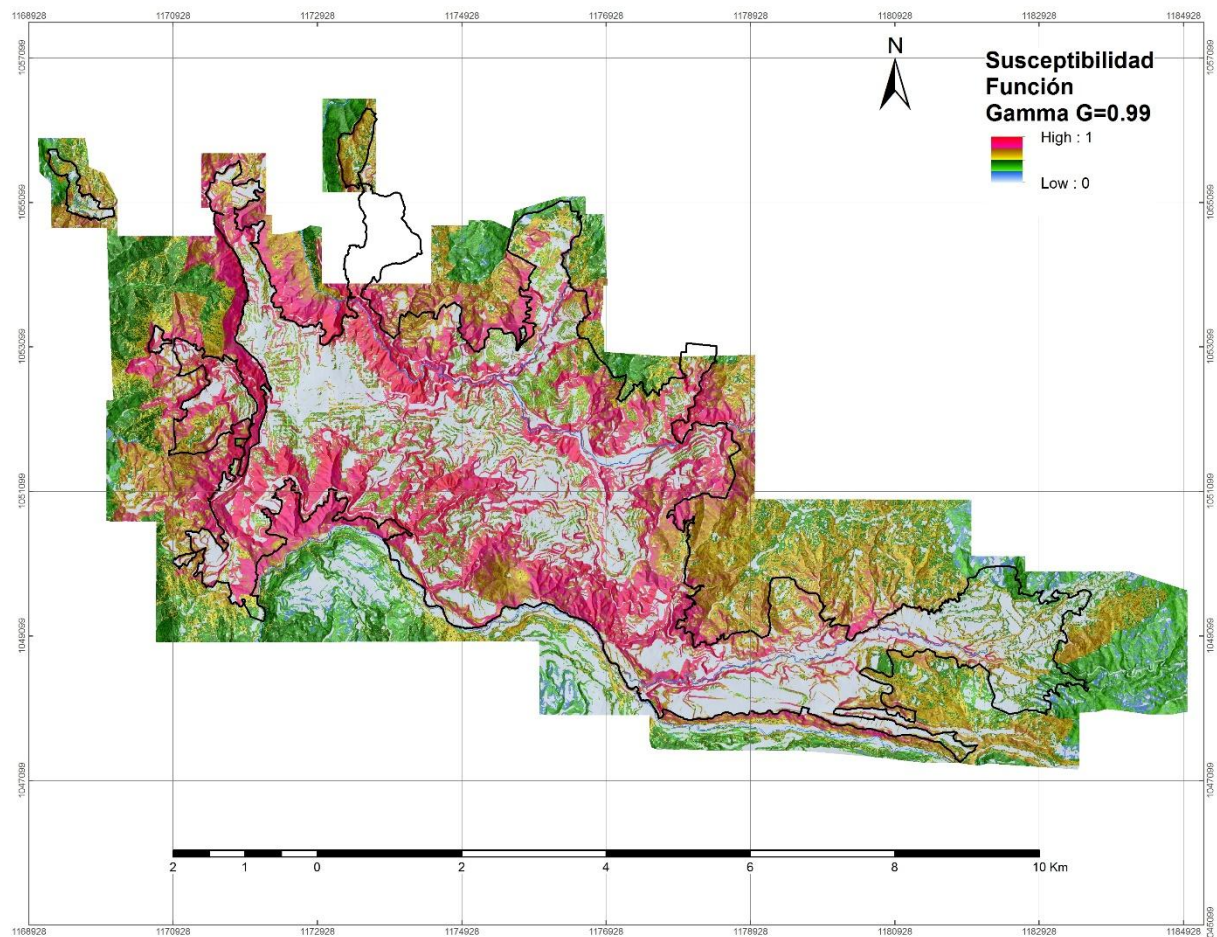


Figura 113. Mapa de susceptibilidad mediante la aplicación de conjuntos difusos

En cuanto a rendimiento, el mejor modelo es el que se obtiene con un valor gamma de 0.99, como puede observarse en la Tabla 56 y la Figura 114.

Tabla 56. Parámetros de rendimiento de modelos por conjuntos difusos

	G050	G075	G090	G095	G099
fp	306	279	165	81	44
tp	21	48	162	246	283
tn	323	316	269	215	111
fn	4	11	58	112	216
AUC_D	0,120884	0,26538	0,50161	0,61835	0,71485
AUC_E	0,03332	0,09576	0,27946	0,42586	0,5755
SENSIBILIDAD	0,06422	0,14679	0,49541	0,75229	0,86544
ESPECIFICIDAD	0,987768	0,96636	0,82263	0,65749	0,33945
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,525994	0,55657	0,65902	0,70489	0,60245
SENSIBILIDAD	0,06422	0,14679	0,49541	0,75229	0,86544
ESPECIFICIDAD	0,012232	0,03364	0,17737	0,34251	0,66055
GILBERT SCORE	0,063444	0,14201	0,42078	0,56036	0,52118
PEIRCE SKILL SCORE	-0,00896	-0,0301	-0,1713	-0,3302	-0,6378
HEIDKE SKILL SCORE	0,051988	0,11315	0,31804	0,40979	0,20489
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,694268	0,66343	0,63987	0,70718	0,53545

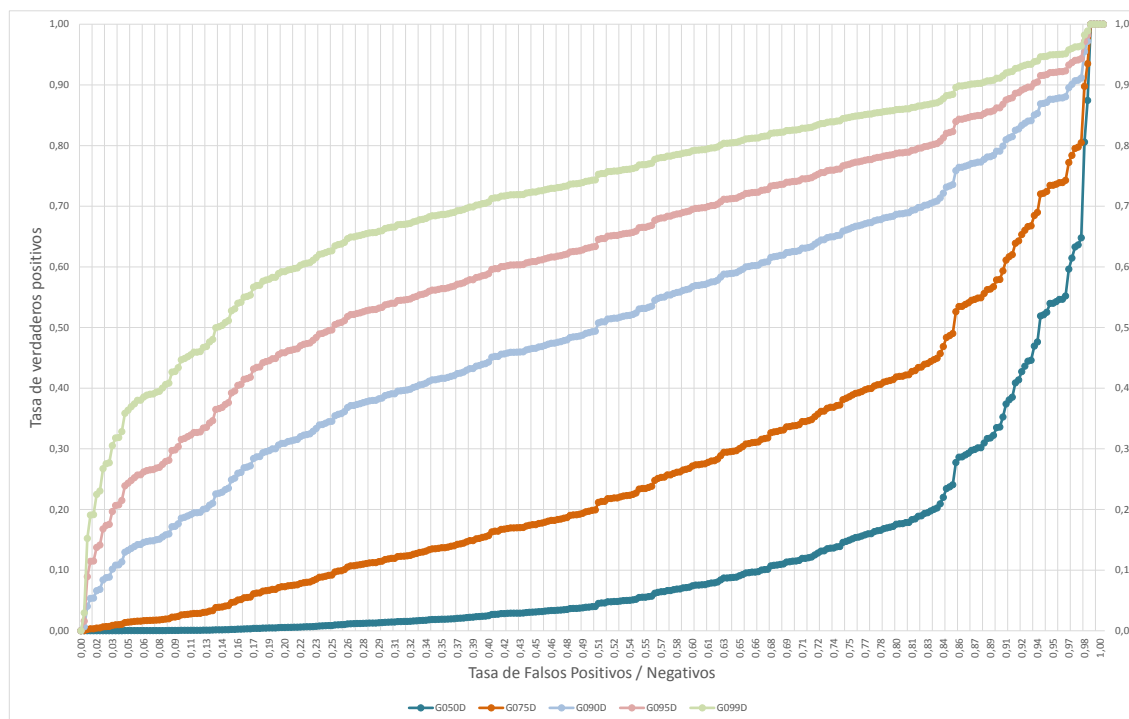


Figura 114. Curvas de rendimiento de modelos por conjuntos difusos

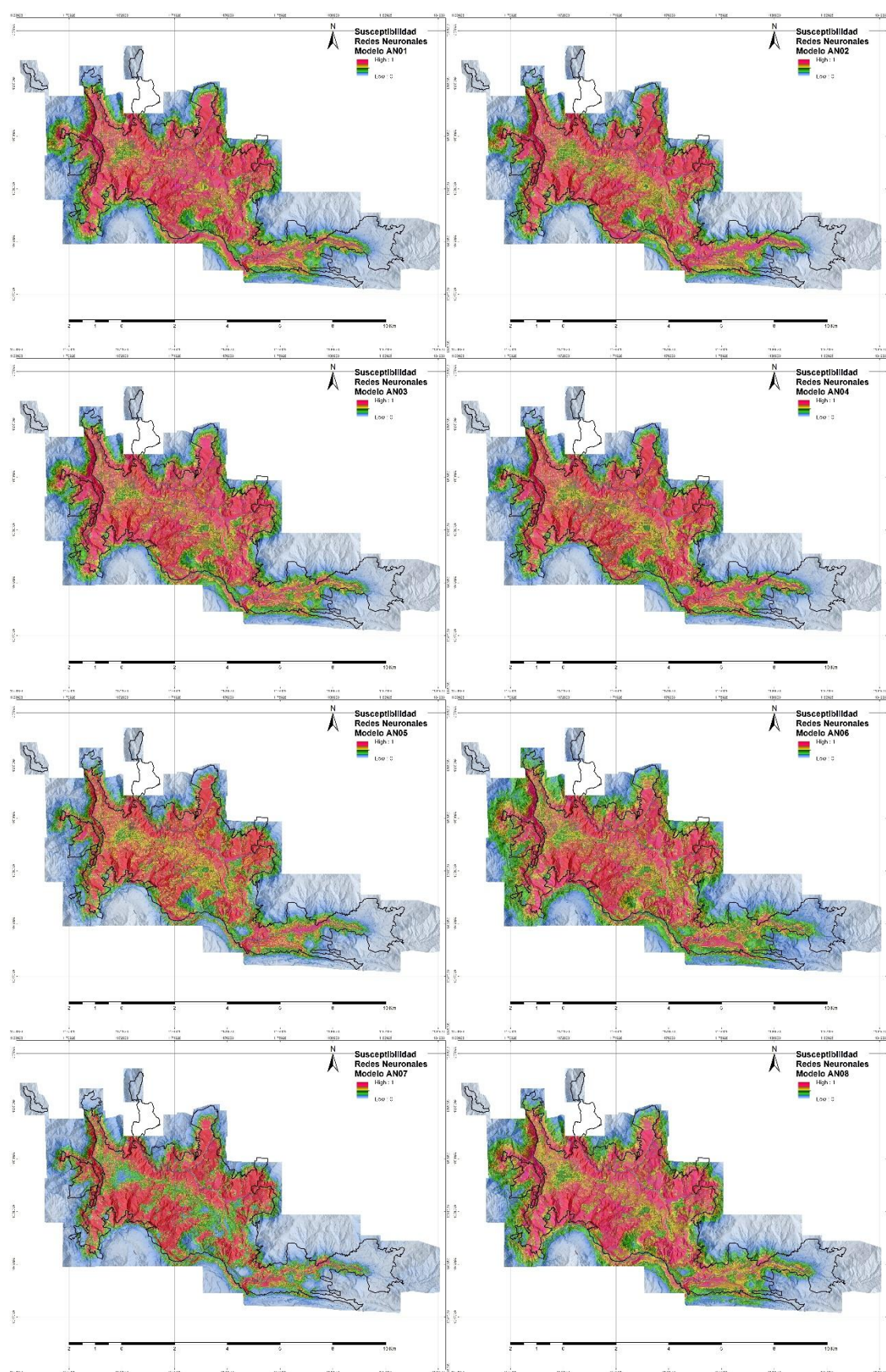
3.2.4.4. Método de Redes Neuronales Artificiales

El proceso de asignación de estos tres conjuntos de datos ha llevado a la construcción de 10 modelos diferentes, en los cuales los datos van asumiendo el rol de entrenamiento, validación y test, como se muestra en la Tabla 57, de manera que cada modelo presenta una subdivisión única de los conjuntos de datos.

Tabla 57. Distribución de la DB para elaboración de modelos de RNA

AN01	AN02	AN03	AN04	AN05	AN06	AN07	AN08	AN09	AN10
10% training	testing	testing	cross val	cross val	training	training	training	training	training
10% training	training	testing	testing	cross val	cross val	training	training	training	training
10% training	training	training	testing	testing	cross val	cross val	training	training	training
10% training	training	training	training	testing	testing	cross val	cross val	training	training
10% training	training	training	training	training	training	testing	testing	cross val	cross val
10% cross val	training	training	training	training	training	training	testing	testing	cross val
10% cross val	cross val	training	training	training	training	training	training	testing	testing
10% testing	cross val	cross val	training	training	training	training	training	training	testing
10% testing	testing	cross val	cross val	training	training	training	training	training	training

El resultado del proceso son 10 modelos diferentes (Figura 115), que se agregan en un único modelo medio (Figura 117), obteniendo una función de susceptibilidad acotada entre 0 y 1, que constituye la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, representada espacialmente y una desviación estándar para tener una idea de la calidad del resultado (Figura 116).



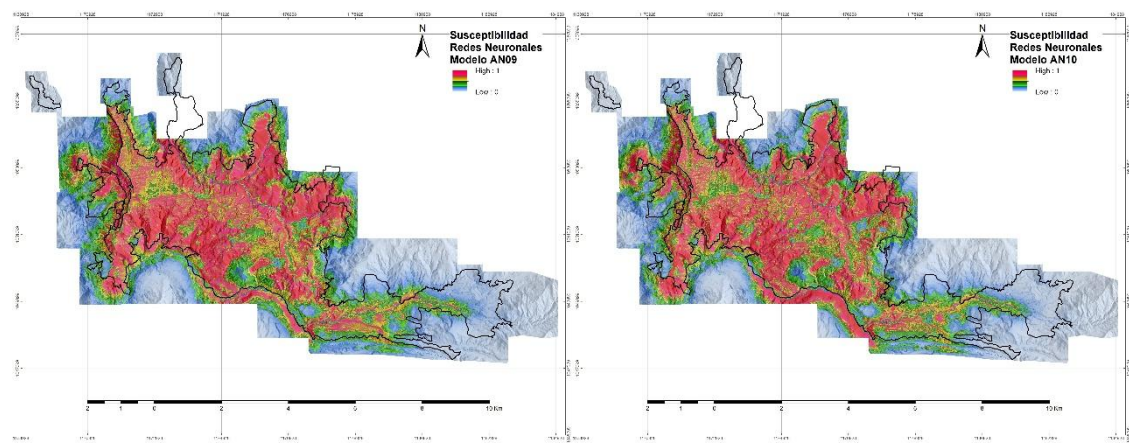


Figura 115. Diferentes modelos de RNA calculados

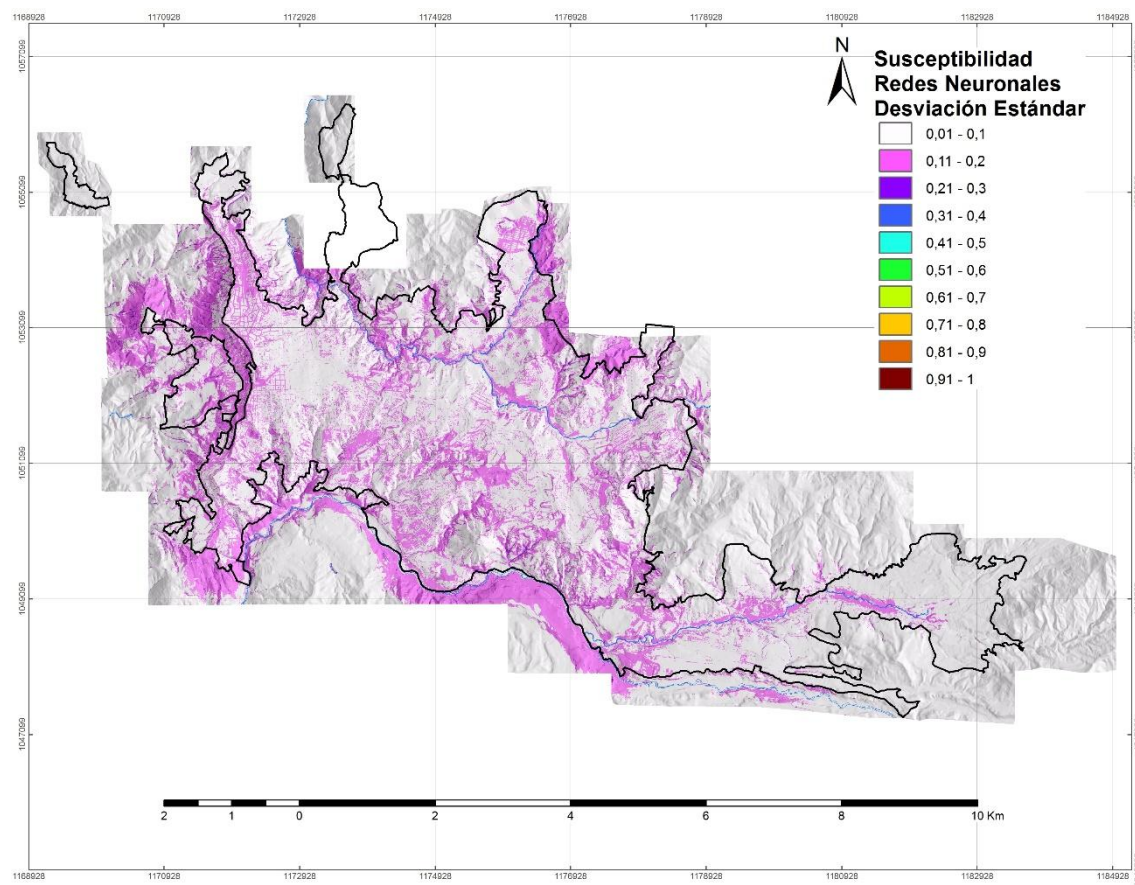


Figura 116. Desviación estándar de los modelos de RNA

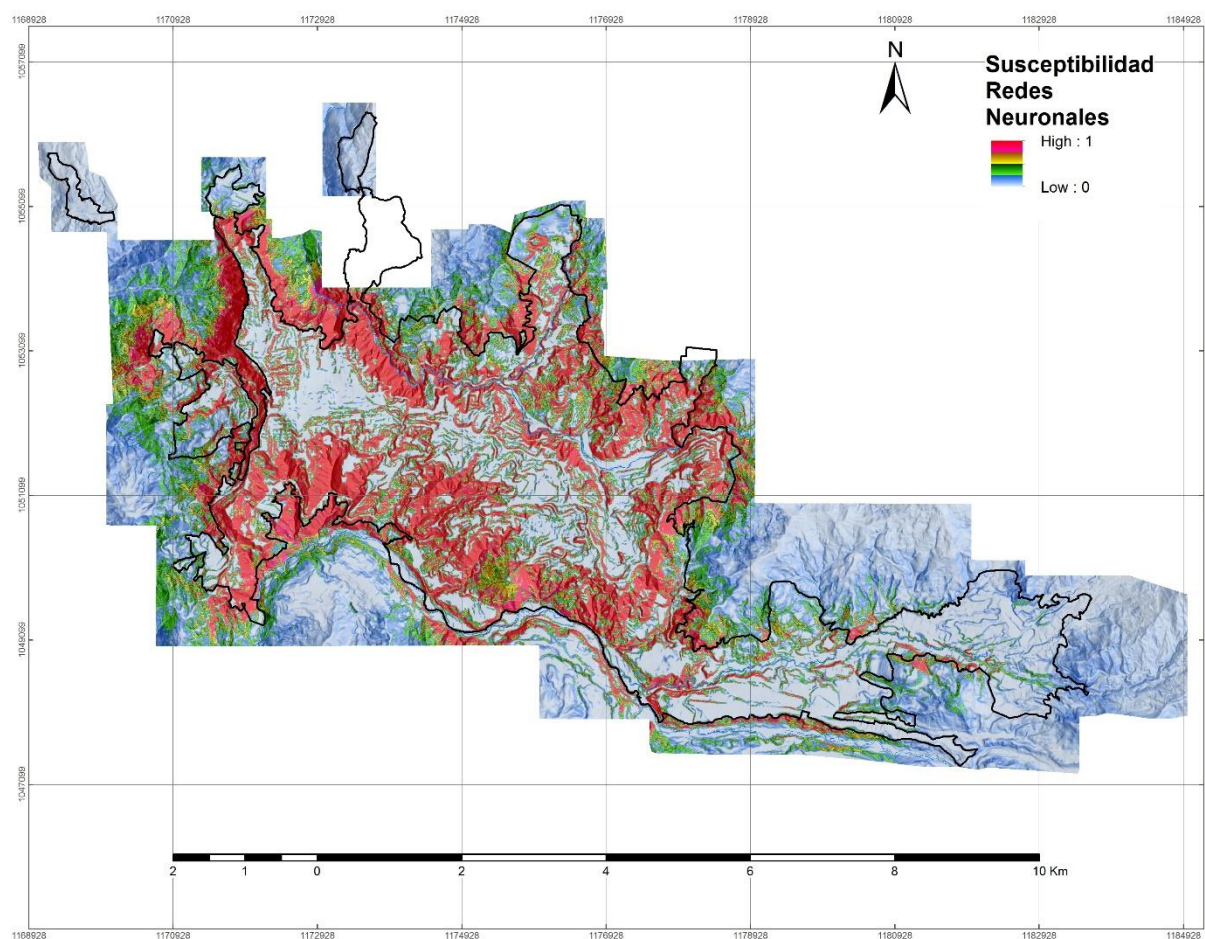


Figura 117. Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales

Los parámetros de rendimiento de los diez modelos y el modelo medio pueden observarse en la Tabla 58 y la Figura 118.

Tabla 58. Parámetros de rendimiento de modelos por redes neuronales

	ANMean	AN01	AN02	AN03	AN04	AN05	AN06	AN07	AN08	AN09	AN10
fp	24	24	23	22	31	57	33	66	20	50	52
tp	303	303	304	305	296	270	294	261	307	277	275
tn	189	183	182	167	186	236	183	239	164	214	216
fn	138	144	145	160	141	91	144	88	163	113	111
AUC_D	0,757	0,771	0,807	0,792	0,750	0,698	0,721	0,651	0,794	0,704	0,721
AUC_E	0,418	0,431	0,416	0,467	0,417	0,316	0,446	0,290	0,468	0,369	0,363
SENSIBILIDAD	0,927	0,927	0,930	0,933	0,905	0,826	0,899	0,798	0,939	0,847	0,841
ESPECIFICIDAD	0,578	0,560	0,557	0,511	0,569	0,722	0,560	0,731	0,502	0,654	0,661
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,752	0,743	0,743	0,722	0,737	0,774	0,729	0,765	0,720	0,751	0,751
SENSIBILIDAD	0,927	0,927	0,930	0,933	0,905	0,826	0,899	0,798	0,939	0,847	0,841
ESPECIFICIDAD	0,422	0,440	0,443	0,489	0,431	0,278	0,440	0,269	0,498	0,346	0,339
GILBERT SCORE	0,652	0,643	0,644	0,626	0,632	0,646	0,624	0,629	0,627	0,630	0,628
PEIRCE SKILL SCORE	-0,380	-0,399	-0,400	-0,444	-0,399	-0,261	-0,410	-0,254	-0,448	-0,326	-0,320
HEIDKE SKILL SCORE	0,505	0,486	0,486	0,443	0,474	0,547	0,459	0,529	0,440	0,502	0,502
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,891	0,883	0,886	0,871	0,853	0,849	0,838	0,830	0,878	0,826	0,823

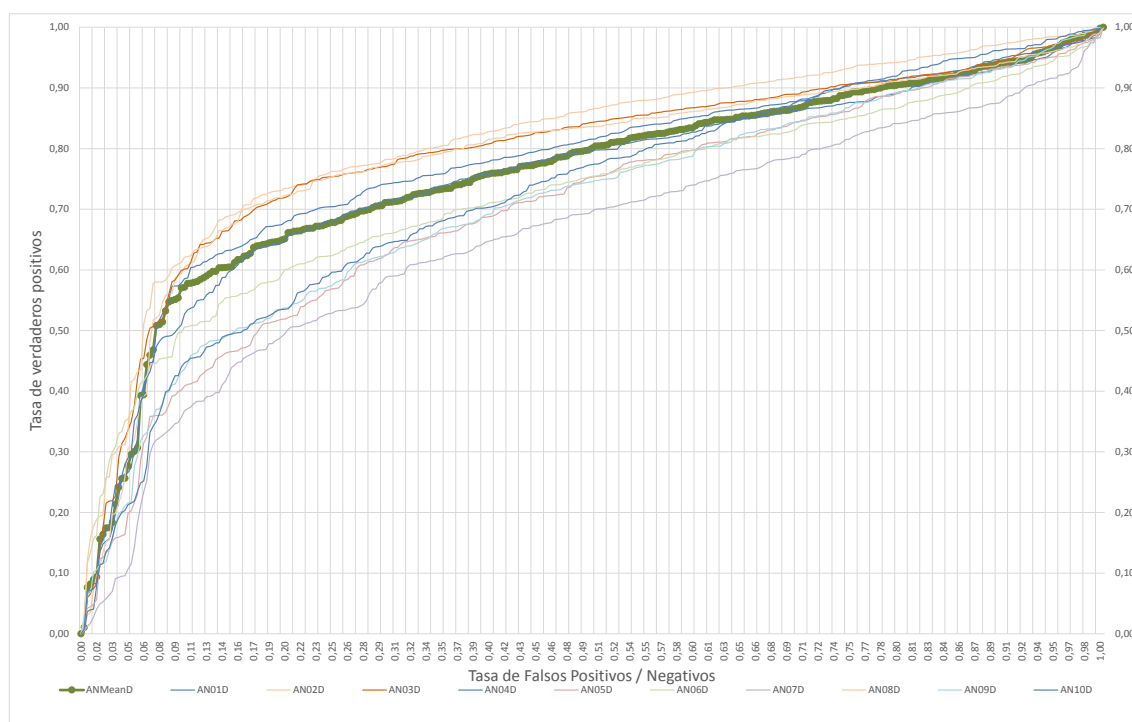


Figura 118. Curvas de rendimiento de modelos por conjuntos difusos

3.2.4.5. Pruebas de rendimiento

Los resultados generales obtenidos por los diversos métodos, en términos de capacidad de clasificación de zonas susceptibles, se muestran en la Figura 119. De una inspección del gráfico, puede concluirse que los modelos de análisis discriminante y el modelo de Redes Neuronales muestran el mejor rendimiento en cuanto a correcta clasificación de celdas inestables.

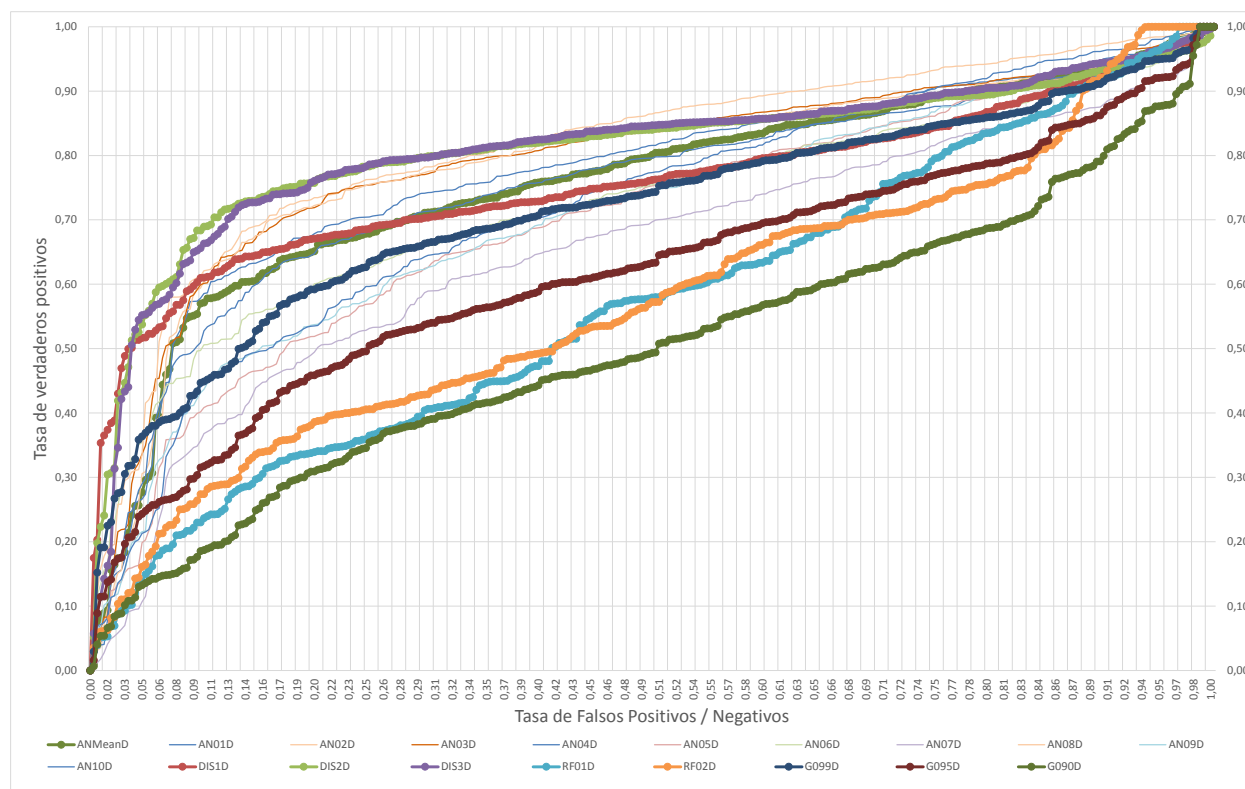


Figura 119. Comparativa de métodos de modelización de susceptibilidad

Capítulo 4. UTILIZACIÓN DE LOS MODELOS

4.1. Introducción

El IRGC (International Risk Governance Council) ha propuesto un marco de trabajo de riesgo, integrativo, basado en el concepto de gobernanza del riesgo (risk governance) (Renn 2005, 2008b, IRGC 2007, Bischof 2008) ofreciendo un enfoque multinivel e interdisciplinar.

Este enfoque implica a los cuatro actores centrales en las sociedades plurales modernas: gobiernos, actores económicos, científicos y a la sociedad civil. La gobernanza del riesgo, incluye pero va más allá de los tres elementos principales del análisis de riesgo: evaluación del riesgo, gestión del riesgo y comunicación del riesgo.

El concepto de gobernanza incluye aspectos de diseño institucional, metodologías técnicas, consultoría administrativa, procedimientos legislativos y rendición de cuentas políticas (accountability) por parte de los entes públicos, y responsabilidad social y corporativa por parte del sector privado.

El marco se divide en dos desafíos de la gobernanza del riesgo: generar y recopilar conocimiento sobre el riesgo, y tomar decisiones para gestionarlo. Adicionalmente, ofrece una taxonomía de cuatro fases de actividades interrelacionadas que incluyen procedimientos paso a paso para relacionarse con el riesgo. Tales fases se denominan Pre Evaluación, Valoración, Análisis de Tolerabilidad y Aceptabilidad, y Gestión, como se presenta en la

Figura 120. Adicionalmente, la comunicación debe ir superpuesta a las cuatro fases, contemplando la posibilidad de que sea un proceso de diálogo interinstitucional e interdisciplinario constante.

Este marco de interpretación constituye un punto de partida adecuado para incorporar la gestión del riesgo a la toma de decisiones y más específicamente al ordenamiento territorial, campo natural de su aplicación.

En las siguientes páginas, se presenta para la ciudad de Manizales (Colombia), una propuesta de diversas actividades que encajan en las diferentes fases de este enfoque, buscando ilustrar cómo considerar el riesgo urbano dentro de un marco de gobernanza urbana, generando así, instrumentos de ordenamiento territorial.

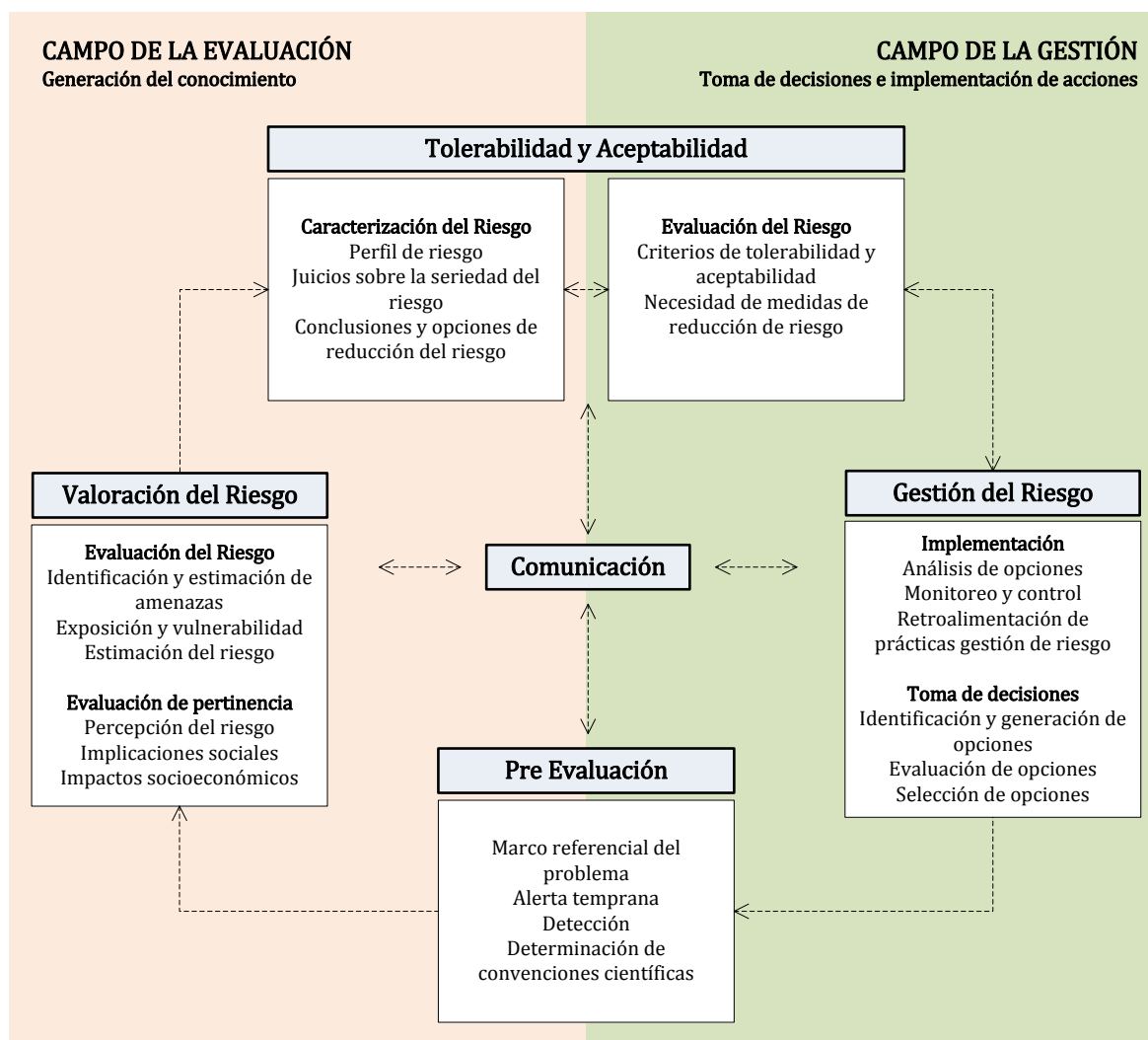


Figura 120. Elementos básicos del marco de gobernanza del riesgo según International Risk Governance Council. Adaptado de IRGC (2007, p.6)

Como se describió en el Capítulo 2 de esta tesis, el proceso de generar mapas de susceptibilidad a deslizamientos es complejo y requiere la aplicación de una serie de métricas sobre diversos insumos para generar un resultado que exprese la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en términos espaciales; es decir, que determine la zonificación del área según sea mayor o menor su propensividad a presentar deslizamientos.

Esta zonificación está representada por un mapa tipo ráster, pero además por una función que determina los valores individuales de cada píxel, y se acota entre cero o zona estable, y 1 o zona muy susceptible.

Evidentemente, la presentación de los resultados de esta manera es útil para personas familiarizadas con la ingeniería, pero poco aporta en términos de ordenamiento territorial, pues no define categorías ni posibilidades de actuación desde la gestión del territorio. En este sentido, se hace necesario considerar los mapas iniciales como una base o soporte a partir de la cual se deben

proponer procesos que lleven a la generación de herramientas para incluir sus resultados en planes de gestión. Dentro de los procesos necesarios para adecuar los modelos se tiene:

- Definición de categorías de la susceptibilidad o amenaza (útiles) para fines de ordenamiento.
- Definición de áreas apropiadas para el ordenamiento territorial: el mapa ráster obtenido debe ser transformado o agregado en un mapa agregado a partir de unidades mínimas de planificación que tengan algún sentido físico o que tengan utilidad normativa.
- Propuesta de acciones concretas aplicables a cada zona de actuación identificada, en términos de acciones correctivas, acciones prospectivas y prescriptivas que permitan servir de enlace entre zonificación de susceptibilidad/amenaza/riesgo y ordenamiento territorial.
- Incorporación de áreas con tratamientos geotécnicos o estructuras de mitigación que reduzcan los niveles de susceptibilidad/amenaza.
- Incorporación del factor detonante y el componente temporal para obtener mapas de amenaza en términos de probabilidades de ocurrencia del fenómeno.
- Incorporación del factor detonante en términos de umbrales mínimos, para constituir sistemas de alerta temprana.
- Cálculo de pérdidas económicas y humanas

4.2. Definición de categorías de susceptibilidad para el Ordenamiento Territorial

A partir del modelo de susceptibilidad obtenido para la ciudad en la parte 2 de esta investigación, cuya representación numérica es una función continua acotada entre cero y uno, deben establecerse una serie de categorías descriptivas de los niveles obtenidos.

Se ha optado por seguir los lineamientos de categorización utilizando probabilidades relativas sugeridos por el IPCC (Tabla 59) y elegir como primer criterio de división de clases los tercios de la función y como segundo criterio los niveles más altos y más bajos, determinados por un límite de 0.1 (10%).

Tabla 59. Valoración de probabilidades relativas según (IPCC 2013, p.36)

Término	Rango de Probabilidad
Virtualmente cierto	99-100%
Muy Probable	90-100%
Probable	66-100%
Tanto probable como no probable	33-66%
Improbable	0-33%
Muy Improbable	0-10%
Excepcionalmente improbable	0-1%

De esta forma, los rangos quedan establecidos como aparece en la Tabla 60.

Tabla 60. Criterios para categorizar la susceptibilidad

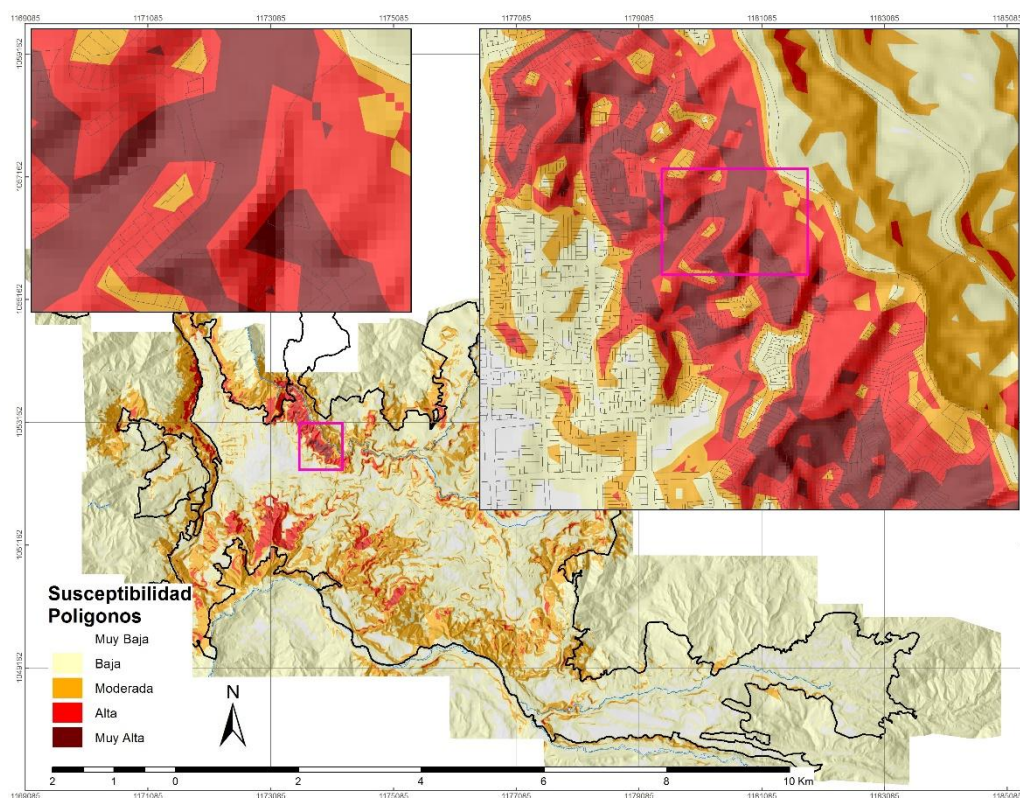
Criterio	Rango	Descriptivo
Primer tercio 10% más bajo	0 – 0.10	Muy Baja
	0.10 – 0.33	Baja
Segundo tercio	0.33 – 0.66	Moderada
Tercer tercio 10% más alto	0.66 – 0.90	Alta
	0.90 - 1	Muy Alta

Con estos criterios es posible proponer un mapa con categorías definidas en términos cualitativos que den cuenta de la “gravedad” de la susceptibilidad.

No obstante, dado el formato ráster utilizado, la representación gráfica no es continua, y puede darse el caso de encontrar píxeles aislados de diferentes categorías; adicionalmente, al agrupar valores por categoría pueden generarse polígonos de diferentes tamaños, lo cual, para fines de gestión del territorio puede ser un inconveniente. Por este motivo debe definirse un área mínima de agregación que permita reclasificar los valores numéricos y categóricos, asignando valores uniformes a un polígono mínimo que tenga algún sentido físico o normativo.

4.3. Áreas de Planificación

La salida del modelo neuronal para la susceptibilidad a deslizamientos es un mapa ráster con resolución de píxel de 5 metros; éste resultado puede convertirse en un mapa de contornos como se mencionó anteriormente, que para facilitar su interpretación, presenta el resultado en 5 clases o niveles en función de las categorías de susceptibilidad definidas; un extracto del mapa correspondiente puede observarse en la Figura 121.



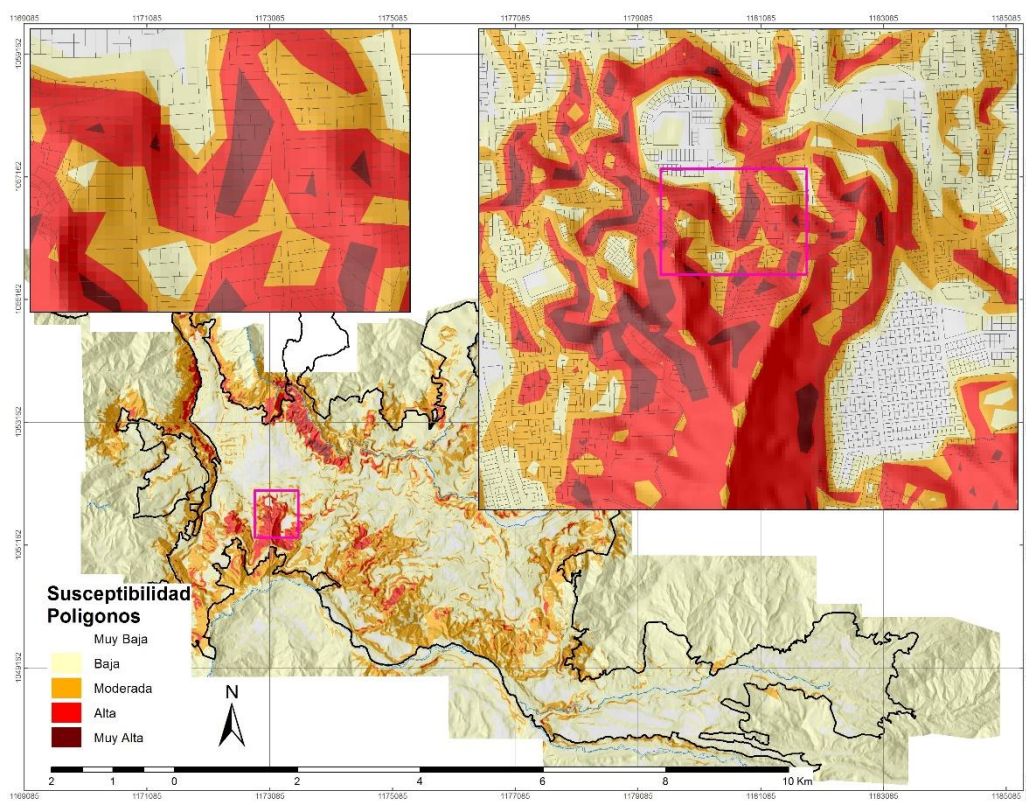


Figura 121. Mapa de susceptibilidad en contornos

Teniendo en cuenta que las implicaciones de la zonificación de susceptibilidad desde la óptica del ordenamiento tiene sentido en unidades prediales, pues es a ese nivel que se otorgan permisos de construcción o en general, de utilización del predio, parece lógico agregar los valores en estas unidades, remuestreando para cada polígono la susceptibilidad y asignando un único valor para la totalidad del área delimitada. Para tal efecto se han probado diferentes métricas de agregación (estadísticas focales) para el conteo de celdas dentro de los polígonos prediales. Finalmente se ha elegido el método de agregación *Majority*, que toma el valor más frecuente de los píxeles inscritos dentro del polígono para reasignar un valor a la totalidad del polígono (Figura 122).

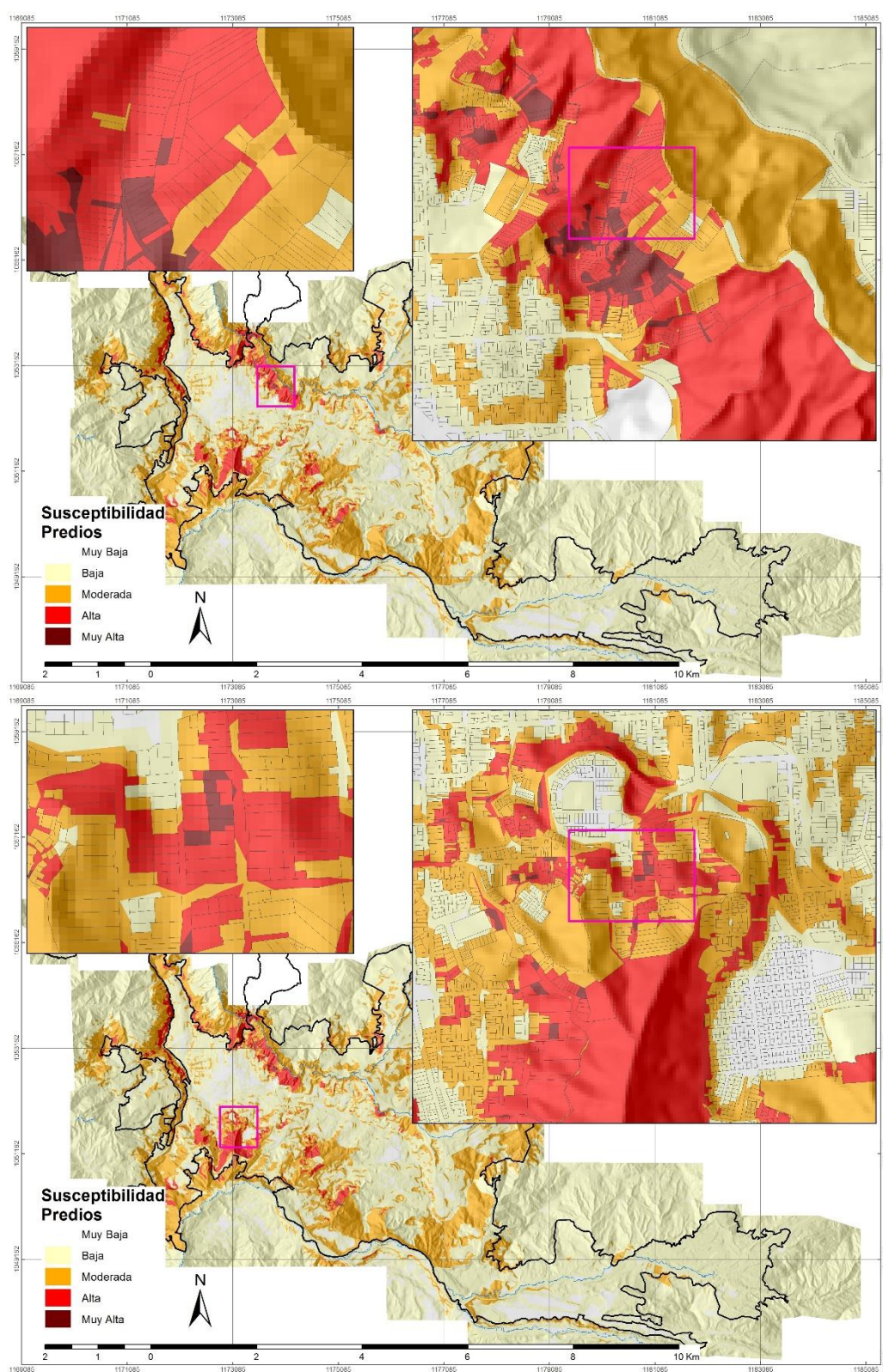


Figura 122. Susceptibilidad agregada por predios

No obstante, se observa que las dos formas de representar la susceptibilidad de deslizamientos a nivel urbano siguen presentando inconvenientes. Por un lado, la utilización de polígonos con los valores “calculados” de susceptibilidad evidencia una incompatibilidad cuando se superpone el mapa predial, pues pueden darse casos en que un predio contenga diferentes categorías de susceptibilidad. De otro lado, al agregar la susceptibilidad mediante los contornos

prediales, se soluciona esta situación, pero se generan en algunos casos áreas de enorme extensión en una sola categoría de susceptibilidad, lo cual no es realista.

Para llegar a una solución en cuanto a la unificación de criterios de agregación, mediante un trabajo conjunto con la Alcaldía de Manizales, se decidió combinar los dos mapas propuestos en uno solo, tomando como criterio de unión el área más frecuente de los lotes del mapa predial. Para áreas menores a 400 metros cuadrados se optó por seleccionar la susceptibilidad agregada en lotes, lo cual corresponde aproximadamente con lotes construidos. Para áreas mayores a 400 metros cuadrados se seleccionó como área de agregación de susceptibilidad el mapa de contornos, lo cual corresponde aproximadamente con áreas no construidas.

4.4. Incorporación de Áreas con tratamientos geotécnicos y obras de mitigación

Las laderas estabilizadas mediante procedimientos de tratamiento geotécnico (Figura 123) se incorporan al modelo como polígonos que reducen los niveles de susceptibilidad. El monto de reducción de la susceptibilidad depende del grado de mitigación que ofrezca la obra de tratamiento geotécnico según sus especificaciones técnicas. La Alcaldía de Manizales ha suministrado el mapa de ATGs divididas en tres tipos, según el grado de mitigación que proporcionan: alto, medio y bajo.

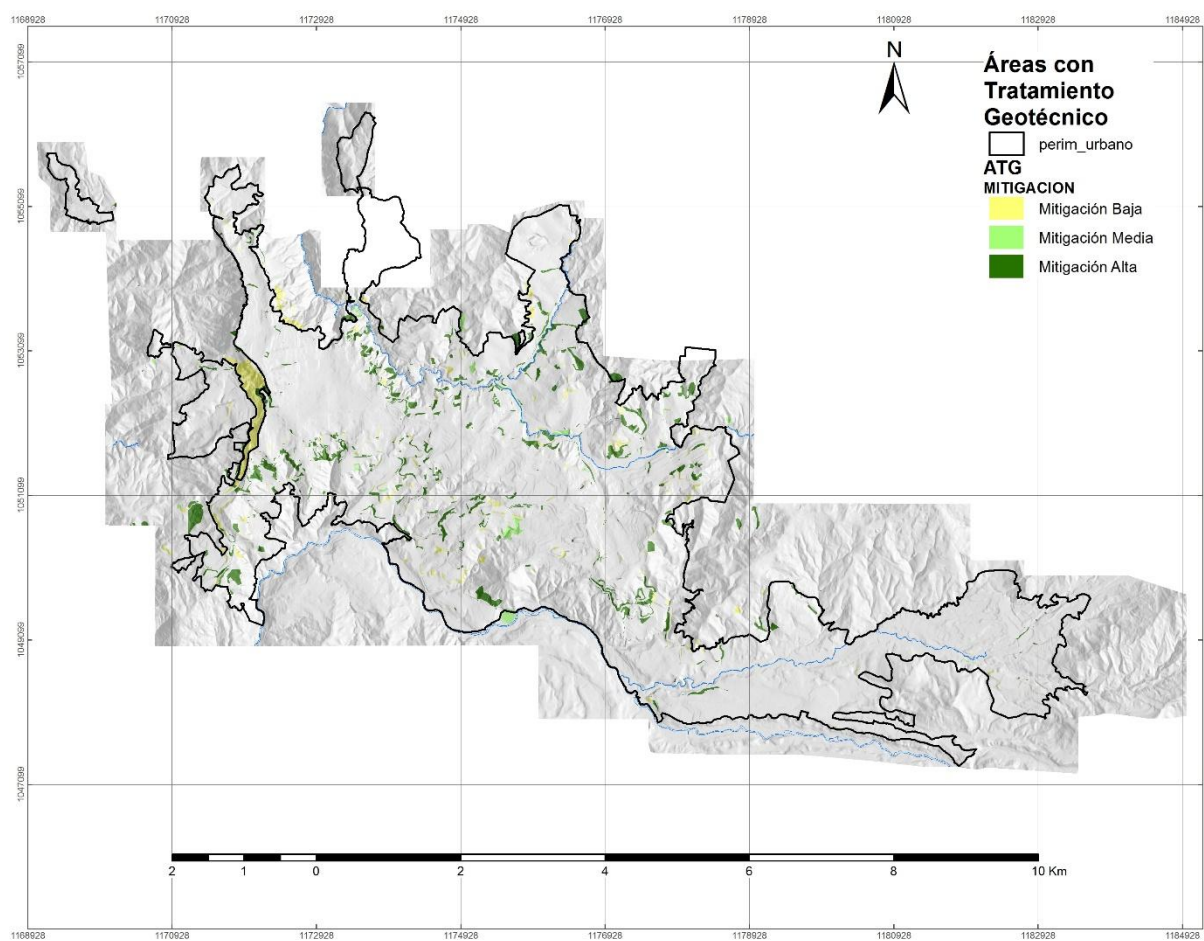


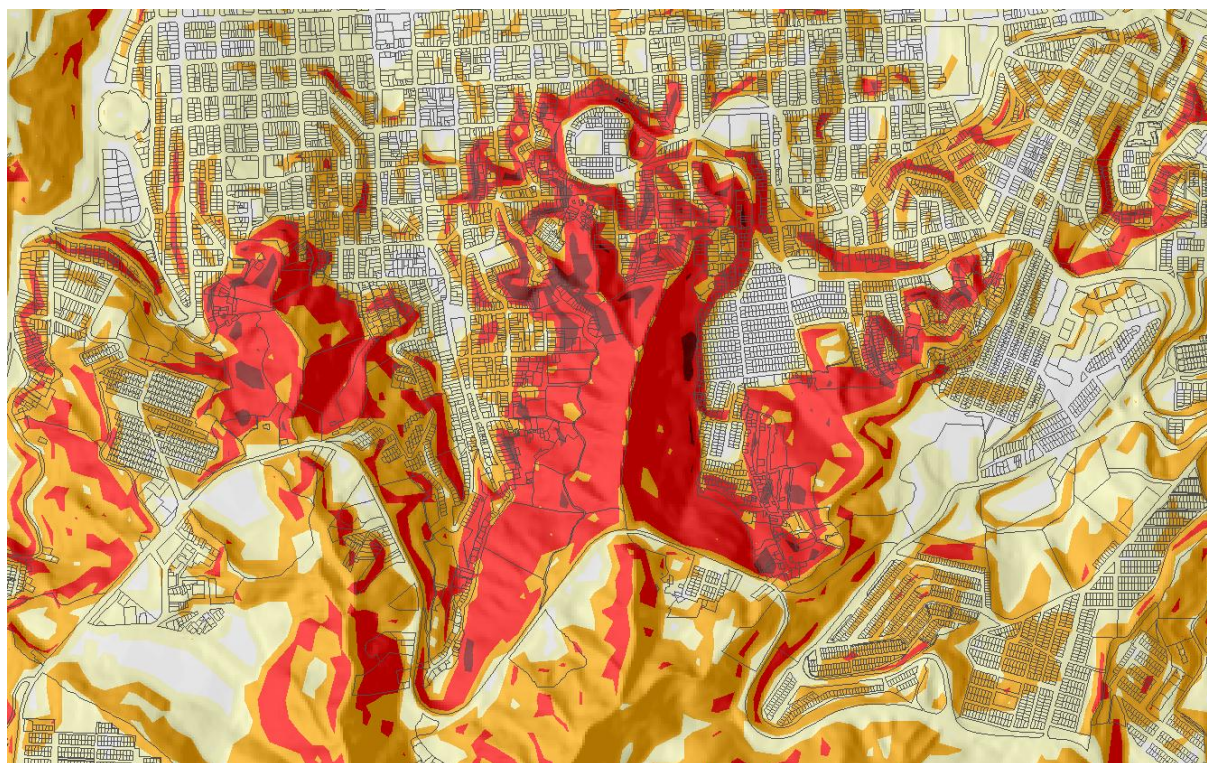
Figura 123. Mapa de áreas de tratamiento geotécnico ATG

La reducción de susceptibilidad se da de acuerdo con la Tabla 61; dependiendo del tipo de ATG se puede reducir desde un nivel hasta tres niveles el grado de susceptibilidad en una escala de 5 clases.

Tabla 61. Tipos de obras de mitigación y reducción de la susceptibilidad

Tipo de ATG	Nivel de mitigación	Reducción de susceptibilidad
1	Alto	3 niveles
2	Medio	2 niveles
3	Bajo	1 nivel

La Figura 124 muestra el efecto que tiene la incorporación de las obras de mitigación en el mapa de susceptibilidad general original (figura superior). Nótese que se generan polígonos (figura inferior) en los cuales es evidente que la susceptibilidad se hace menor gracias a la intervención correctiva de la ladera.



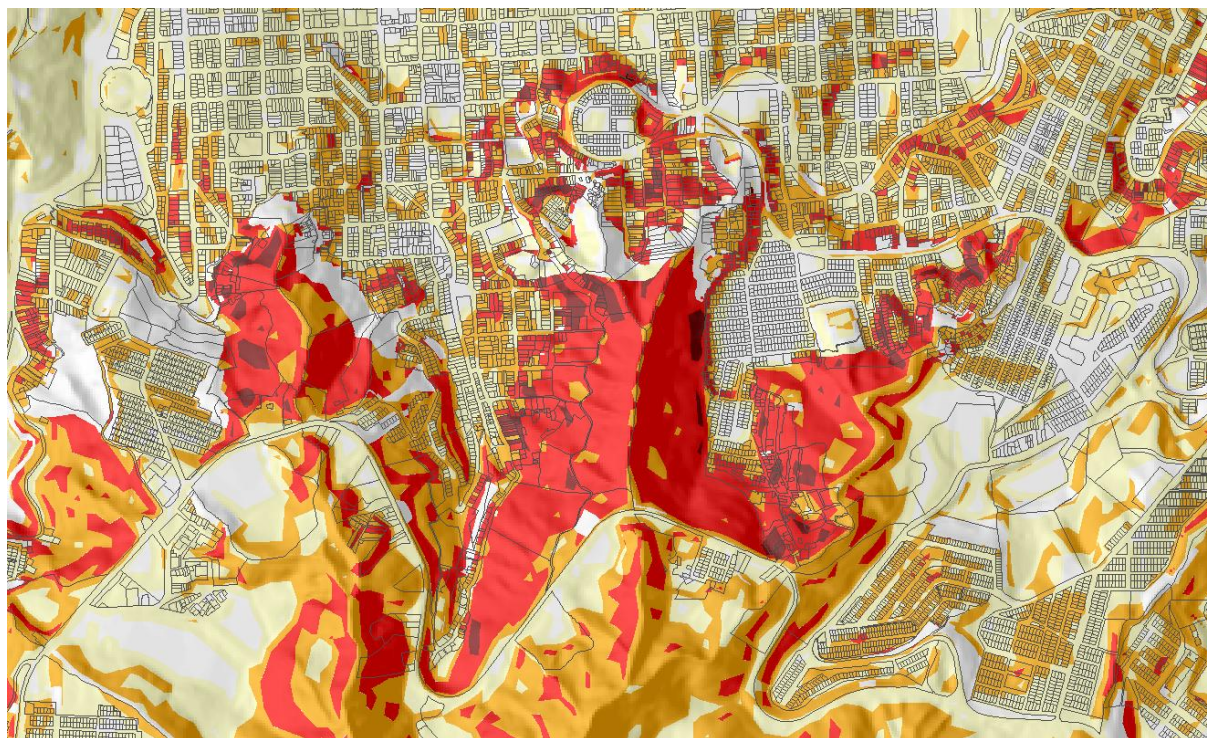


Figura 124. Efecto de la incorporación de Áreas de Tratamiento Geotécnico a los Modelos de Susceptibilidad

4.5. Riesgo Tácito

Desde el punto de vista del ordenamiento territorial no todas las amenazas son realmente relevantes en la definición de los usos del suelo; es decir, no todos los fenómenos tienen una alta incidencia en la posibilidad de que ciertas áreas deban ser ocupadas o que se puedan realizar actividades que signifiquen la exposición permanente de activos, bienes o servicios y, sobretodo, de personas que puedan permanecer en dichas áreas consideradas como propensas a ser afectadas por fenómenos peligrosos. A este tipo de amenazas se pueden asociar fenómenos como los deslizamientos o procesos de remoción en masa, los flujos de lodo o de escombros, las avalanchas, las inundaciones de alta pendiente o comportamiento torrencial, entre otros, cuya energía es tan alta que su intensidad se considera lo suficientemente severa para que cualquier elemento expuesto, en términos prácticos, esté sujeto a un daño total o casi total en caso de presentarse o desencadenarse el evento peligroso (Cardona et al, 2014).

En otras palabras, estar expuesto en las áreas propensas a este tipo de fenómenos implica un alto potencial de consecuencias o una situación de “*Riesgo Tácito*”, en el sentido del adjetivo, para definir aquello que no se expresa formalmente, sino que se supone e infiere. Por esta razón, para fines prácticos, la zonificación de susceptibilidad de este tipo se traduce en una zonificación del riesgo, sea porque ya exista algo expuesto o porque algo pueda estar expuesto en ese sitio en el futuro.

De acuerdo con lo anterior, es importante señalar que el concepto de vulnerabilidad de los elementos expuestos, que media entre la amenaza y el riesgo, no tiene en este caso la misma pertinencia que cuando se trata de fenómenos cuya amenaza es de un amplio espectro de intensidades (desde valores muy pequeños a valores muy altos) y para las cuales se establecen en forma prescriptiva las exigencias de seguridad que se deben cumplir. Es el caso de la actividad sísmica, la acción del viento, la caída de nieve/granizo, la caída de cenizas de origen volcánico, las inundaciones lentas e incluso los incendios forestales, entre otros fenómenos. Claramente en estos casos existe una gradación de la vulnerabilidad que representa del grado de fragilidad de los elementos expuestos ante la severidad de los fenómenos y es fundamental evaluarla para poder estimar el nivel de riesgo físico frente a las intensidades de los eventos factibles. La diferencia fundamental es que en este caso la vulnerabilidad es variable y sólo se satura o es total cuando se trata de un evento extremadamente severo, mientras que en los casos de las amenazas previamente descritas (deslizamientos o inundaciones), la vulnerabilidad del elemento expuesto es total o se satura ante el fenómeno y por eso la identificación de las zonas de amenaza, que usualmente están asociadas más a la frecuencia de los fenómenos que a su intensidad, es en la práctica la identificación de las zonas de riesgo tácito: es decir, sobreentendido o inferido.

Desde el grupo de trabajo en Gestión del Riesgo de la Universidad Nacional de Colombia, se ha estudiado la relación entre la evaluación de riesgos y los mecanismos para utilizar esta herramienta como insumo para el Ordenamiento Territorial (Cardona et al, 2014), con el objeto de derivar intervenciones desde los niveles de Riesgo Tácito (Tabla 62). Otro antecedente destacable es el aporte de Méndez (2014), frente a la amenaza por aludes torrenciales en el caso venezolano del estado de Vargas. Los valores de Probabilidad relativa se derivan de la propuesta de IPCC (Tabla 59), y toman su nombre también de allí. La probabilidad relativa en el caso de deslizamientos es el mapa de susceptibilidad obtenido mediante la técnica de redes neuronales, pues se obtiene precisamente una zonificación en términos de la probabilidad relativa necesaria.

Tabla 62. Niveles de amenaza relativa y riesgo Tácito para el caso de inundaciones y deslizamientos

Amenaza en el área	Probabilidad relativa	Deslizamientos	Riesgo Tácito
Muy Alta	90%-100%	Inestabilidad muy probable	Área virtualmente afectada
Alta	66%-100%	Inestabilidad probable	Afectación muy factible
Moderada	33%-66%	Inestabilidad ni probable ni improbable	Afectación factible
Baja	0%-33%	Inestabilidad improbable	Afectación poco factible
Muy Baja	0%-10%	Inestabilidad muy improbable	Área virtualmente no afectable

El mapa de Riesgo Tácito por deslizamiento obtenido con los criterios descritos se presenta en la Figura 125, con algunos detalles para el sector norte, y para el sector sur en la Figura 126.

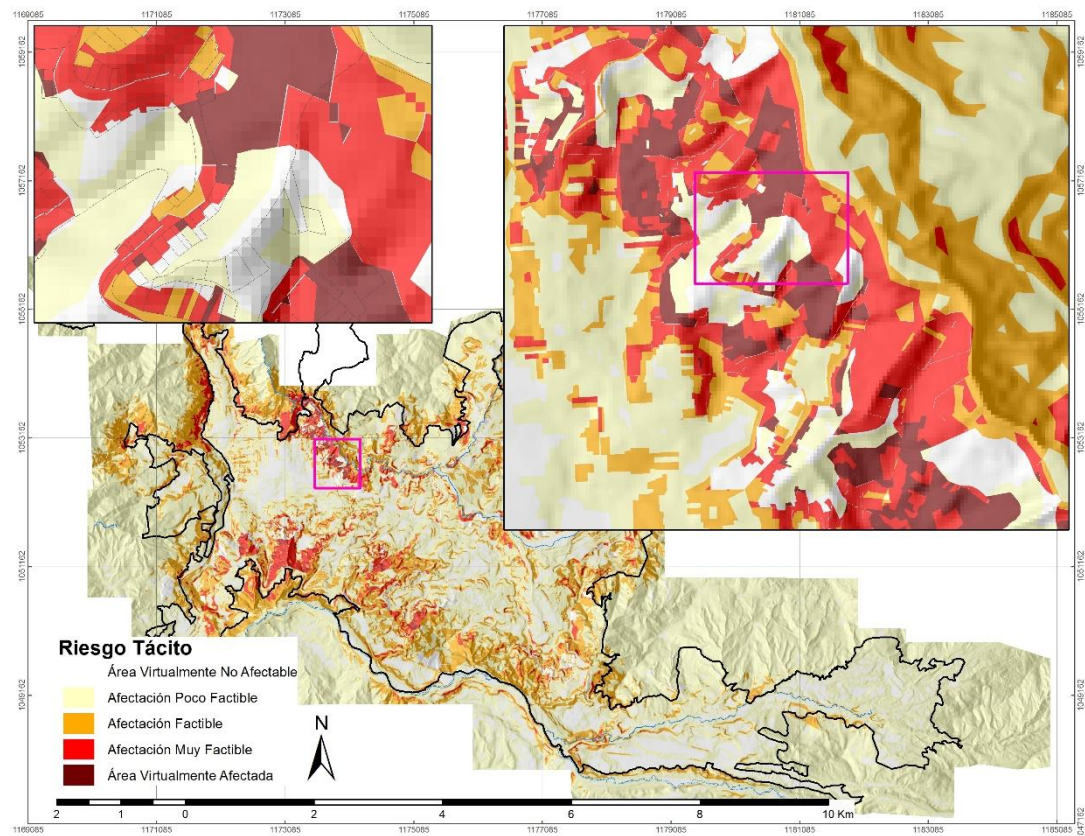


Figura 125. Riesgo Tácito sector norte

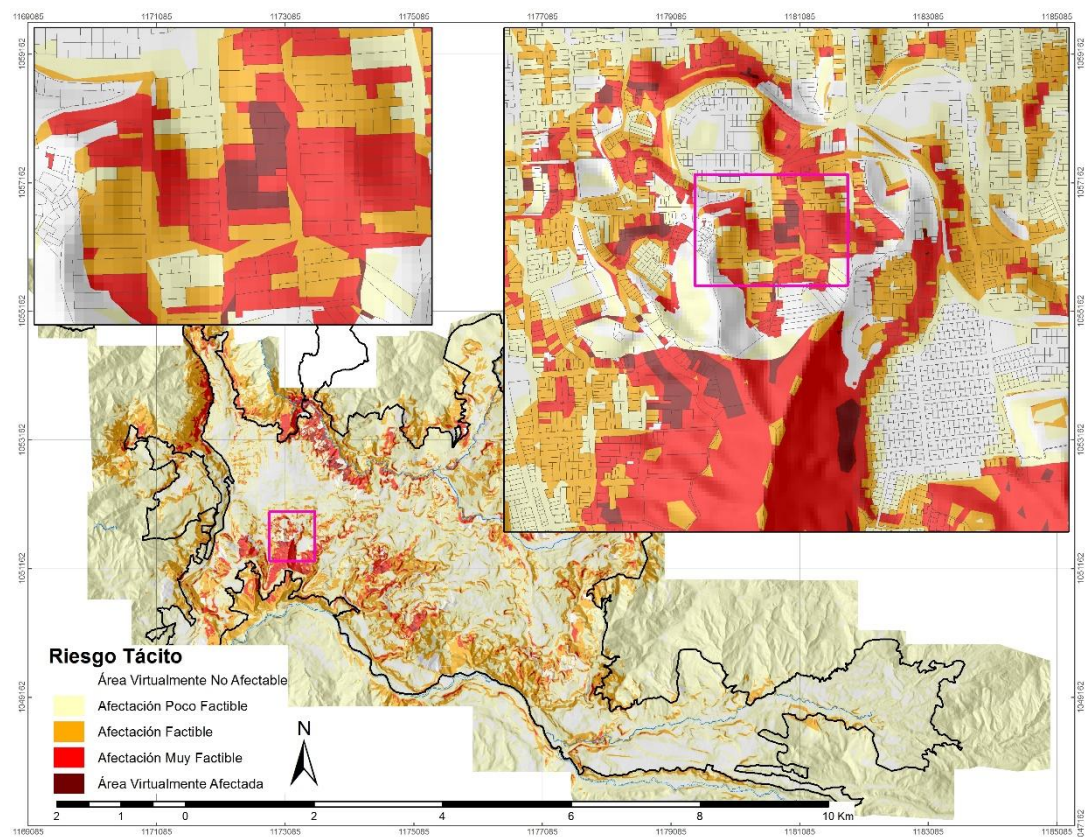


Figura 126. Riesgo Tácito sector sur

4.6. Acciones de planificación territorial

La caracterización del riesgo Tácito en un área no es suficiente si no tiene implicaciones en la imagen objetivo o vocación del territorio en un plazo determinado y en un tratamiento correspondiente. Es importante tener en cuenta que los niveles de amenaza y riesgo son relativos como se presentó previamente, y que la definición de si un riesgo es mitigable o no, también es una definición relativa que depende, además del grado de mitigabilidad de la amenaza y del riesgo, de la factibilidad o decisión de llevar a cabo las intervenciones que reduzcan o controlen el nivel de amenaza existente, lo que sólo puede definirse mediante la realización de estudios detallados y cuidadosos en cada caso. De esto dependerá si la vocación del suelo o la imagen objetivo de su uso (y sus restricciones o condicionamientos) puedan llegar a cambiar en el futuro por la modificación de nivel de amenaza o riesgo del área en consideración durante el tiempo previsto de implementación del instrumento de planificación.

En otras palabras, existe una relación directa entre la definición de los resultados de amenaza y riesgo y la propuesta o decisión en términos de restricción o condicionamientos, e incluso de exigencias o planteamientos de lo que se puede hacer en el área, razón por la cual la definición de los niveles de amenaza y riesgo no debe realizarse en forma desconectada, como lamentablemente se ha venido haciendo hasta ahora en forma convencional con calificaciones arbitrarias de alto, medio y bajo por juicios técnicos que no han tenido en consideración lo que eso implica para la planificación y el desarrollo. En cualquier caso, la definición del grado de amenaza y riesgo implica un trade-off y no debe establecerse sin considerar las opciones que, por ejemplo, aunque puedan implicar costos altos de mitigación, pueden ser factibles y justificables teniendo en cuenta otras consideraciones técnicas, sociales, ambientales, culturales y económicas. La realización de medidas estructurales de mitigación o prevención como obras de protección, programas de reforestación, sistemas de alerta, etc. debe ser planteada con especial cuidado para no beneficiar unas áreas en detrimento de otras; éstas medidas deben hacer parte de las opciones que determinan la viabilidad o no de ocupar o seguir ocupando áreas propensas en algún grado de ser afectadas (Cardona et al., 2014).

Por lo anterior, se considera fundamental no sólo establecer los niveles de riesgo Tácito antes mencionados, sino las acciones que se derivan de la calificación de las áreas respectivas. Teniendo en cuenta la Clasificación del Suelo en Colombia y la clasificación de los usos del suelo, se proponen tres tipos de intervenciones asociadas a un nivel de riesgo Tácito contenidas en la Ley 1523 de 2012.

El término Intervención hace referencia al tratamiento del riesgo mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno con el fin de reducir la amenaza que representa, o

de modificar las características intrínsecas de un elemento expuesto con el fin de reducir su vulnerabilidad. Las tres posibles acciones se describen a continuación.

Intervención **correctiva**: Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Intervención **prospectiva**: Proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que las áreas con niveles altos de riesgo Tácito sean ocupadas (en otras palabras, evitando la exposición). Su objetivo último es evitar nuevo riesgo y la necesidad de plantear intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento, y en general, todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población.

En el caso de la Intervención **prescriptiva**, se basa en lo que la Ley en mención define como Reglamentación prescriptiva: Disposiciones cuyo objetivo es determinar en forma explícita exigencias mínimas de seguridad en elementos que están o van a estar expuestos en áreas propensas a eventos peligrosos con el fin de preestablecer el nivel de riesgo aceptable en dichas áreas.

Méndez (2014) hace una revisión de las medidas de reducción del riesgo de desastres propuestas en diferentes casos venezolanos, y analiza la aplicación específica para la amenaza de aludes torrenciales.

La propuesta para incorporar el riesgo de deslizamiento al ordenamiento territorial se basa en una matriz (Tabla 63), la cual tendría en cuenta cada uno de los tipos de riesgo Tácito distribuidos en 5 categorías: áreas virtualmente afectadas, áreas de afectación muy factible, áreas de afectación factible, áreas de afectación poco factible, y áreas virtualmente no afectables; cada una desde la intervención prospectiva, correctiva, y prescriptiva. Estas se cruzarían con los usos del suelo para zonas urbana y rural. Este cruce daría como resultado los usos del suelo permitidos para cada área; así mismo, se definen unos lineamientos que orientarían al tomador de decisiones.

Tabla 63. Tipos de intervenciones asociadas a niveles de riesgo Tácito

Niveles de Intervención	Riesgo Tácito	Intervención Prospectiva (área no ocupada)	Intervención Correctiva (área ocupada)	Intervención Prescriptiva (exigencias)
5	Área virtualmente afectada	Prohibición de asentamientos e infraestructura	Reubicación de asentamientos e infraestructura	Explorar reducir la amenaza
4	Afectación muy factible	Prohibición de asentamientos e	Obras de reducción y protección y sistema de	Reducir la amenaza y proteger el área

		infraestructura	alerta	
3	Afectación factible	Obras de control de la amenaza y sistema de alerta	Obras de protección y sistema de alerta	Controlar la amenaza y proteger el área
2	Afectación poco factible	Obras de control de la amenaza	Sin condicionantes	Controlar la amenaza
1	Área virtualmente no afectable	Sin condicionantes	Sin condicionantes	Sin requisitos

La intervención prospectiva se aplica a zonas aún no ocupadas por asentamientos humanos. La intervención correctiva se presenta en zonas ya ocupadas y, por lo tanto, donde se desarrollan actividades que están en riesgo. La intervención prescriptiva plantea el tipo de análisis y exigencias que se deben cumplir con el fin de reducir o controlar (asegurarse de no dejar aumentar) la amenaza, y si es del caso la exposición en las áreas propensas a los fenómenos peligrosos. Dichas exigencias deben obedecer a una normativa propia de requisitos mínimos de idoneidad y seguridad que no serían más que las reglas del juego para establecer la posible mitigabilidad de la amenaza y el riesgo.

En síntesis, no basta con sólo evaluar la amenaza ante estos fenómenos y el riesgo Tácito que ella implica con fines de ordenamiento territorial, sino que se necesita asociar los niveles de amenaza a intervenciones correctivas, prospectivas y prescriptivas, para finalmente definir las restricciones, los condicionamientos y las exigencias que se deben cumplir en las zonas propensas a la ocurrencia de eventos peligrosos. Utilizando un enfoque metodológico de este tipo, se puede incluir la variable riesgo como determinante en el ordenamiento territorial.

De lo anterior se concluye que el proceso de planificación territorial depende de la categorización de la amenaza y del riesgo Tácito que se deriva, así mismo, de una evaluación técnica que permita dar cuenta de los niveles de peligro y de las posibles consecuencias, daños o pérdidas potenciales que existe en cada sitio o área en consideración.

Tabla 64. Usos del suelo permitidos por tipo de riesgo Tácito

Tipo de riesgo Tácito	Intervención Prospectiva (área no ocupada)	Uso del suelo permitido		Intervención Correctiva (área ocupada)	Uso del suelo permitido		Intervención Prescriptiva (Exigencias)
		Urbano	Rural		Urbano	Rural	
Área virtualmente afectada	Prohibición de asentamientos e infraestructura	Protección	Protección	Reubicación de asentamientos e infraestructura	Servicios*	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Explorar reducir la amenaza
Afectación muy factible	Prohibición de asentamientos e infraestructura	*Transitorio	Protección	Obras de reducción y protección + sistema de alerta	Residencial Comercio Servicios*Institucional**Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con	Reducir la amenaza y proteger el área

Tipo de riesgo Tácito	Intervención Prospectiva (área no ocupada)	Uso del suelo permitido		Intervención Correctiva (área ocupada)	Uso del suelo permitido		Intervención Prescriptiva (Exigencias)
		Urbano	Rural		Urbano	Rural	
						uso suelo rural***	
Afectación factible	Obras de control de la amenaza + sistema de alerta	Servicios*Institucional**Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Obras de protección + sistema de alerta	Residencial Comercio Servicios*Institucional**Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Controlar la amenaza y proteger el área
Afectación poco factible	Obras de control de la amenaza	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Sin condicionantes	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Controlar la amenaza
Área virtualmente no afectable	Sin condicionantes	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Minero Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Sin condicionantes	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Sin requisitos

En síntesis, no basta con sólo evaluar la amenaza ante estos fenómenos y el riesgo Tácito que ella representa con fines de ordenamiento territorial, sino que se necesita asociar los niveles de amenaza a intervenciones correctivas, prospectivas y prescriptivas, para finalmente definir las restricciones, los condicionamientos y las exigencias que se deben cumplir en las zonas propensas a la ocurrencia de eventos peligrosos. Al respecto se propone utilizar en los instrumentos de planificación un enfoque metodológico que permita desarrollar lo indicado en la Tabla 63, con lo cual se puede incluir la variable riesgo como determinante en el ordenamiento territorial.

Lo anterior se traduce en usos del suelo que se podrían permitir o que es factible considerar. A modo de ejemplo de lineamientos de ordenamiento territorial se presenta la

4.7. Inclusión del factor detonante de deslizamientos en los análisis

El marco de trabajo utilizado en estas memorias contempla la inclusión del factor detonante de deslizamientos, que generalmente puede ser de tipo pluviométrico o sísmico. Esta consideración llevaría a tener un estimativo de la frecuencia de ocurrencia del evento, asociada a la frecuencia de ocurrencia del detonante.

En este sentido se distinguen dos formas de utilización del factor detonante: uno para la estimación de frecuencias de excedencia de un umbral acumulativo, a partir del cual, según criterios estadísticos sería factible la ocurrencia de deslizamientos; y otro, definido a partir de las características de lluvias puntuales, que permita, mediante comparación en tiempo real, identificar momentos en los cuales es conveniente emitir señales de alerta temprana.

Tomando como punto de partida los registros pluviométricos de la estación automática *Postgrados*, disponible en la ciudad de Manizales, se obtuvieron las características de las lluvias generadoras de deslizamientos históricos (magnitud, intensidad, duración), así como el monto de precipitación acumulada, probando diferentes períodos de acumulación de lluvia diaria previa al evento de deslizamiento, para valorar las relaciones estadísticas posibles y establecer umbrales sencillos de tipo Intensidad duración y lluvia antecedente acumulada.

Teniendo como base la lluvia diaria, obtenida al acumular los datos obtenidos cada 5 minutos, se calcularon las características de los aguaceros detonantes de deslizamiento en la ciudad y la lluvia antecedente acumulada de tres, siete, quince, veintiuno, veinticinco y treinta días, como se presenta en el Anexo C.

4.7.1. Umbrales intensidad-duración para sistemas de alerta temprana

En la literatura se asume una curva umbral de la forma (Caine 1980; Guzzetti, Peruccacci et al. 2008; Brunetti, Peruccacci et al. 2010)

$$I = \alpha D^{-\beta}$$

Donde I es la intensidad media de la lluvia en mm/h, D es la duración del evento en horas, α es una constante de escalamiento (intercepto), y β es el parámetro de forma que define la pendiente de la curva de tipo potencial.

Es ampliamente aceptado que la selección de una curva como umbral es independiente de cualquier criterio físico (geología, geomorfología, hidrología, meteorología) y que pueden emplearse diferentes formas para la curva umbral.

El método empleado adopta un enfoque “frecuentista” para determinar el intercepto α y la pendiente β de una curva seleccionada para representar el umbral de lluvias. Se basa en el análisis empírico de la frecuencia de ciertas características de aguaceros que han generado deslizamientos conocidos. Información más detallada de la metodología para construir las curvas puede encontrarse en (Brunetti, Peruccacci et al. 2010).

Para evitar problemas asociados con el ajuste de datos en espacios logarítmicos (por ejemplo, el criterio de mínimos cuadrados no funciona), los datos empíricos se transforman en su logaritmo. Los datos empíricos de intensidad media y duración de lluvia se dibujan en un gráfico sencillo de

dispersión (Figura 157). Las parejas de datos Intensidad-Duración en escala logarítmica se ajustan a un modelo lineal mediante el método de mínimos cuadrados, generando una ecuación del tipo

$$\log(I) = \log(\alpha) - \beta \log(D)$$

Que es totalmente equivalente a la ecuación inicial, pero en un espacio lineal.

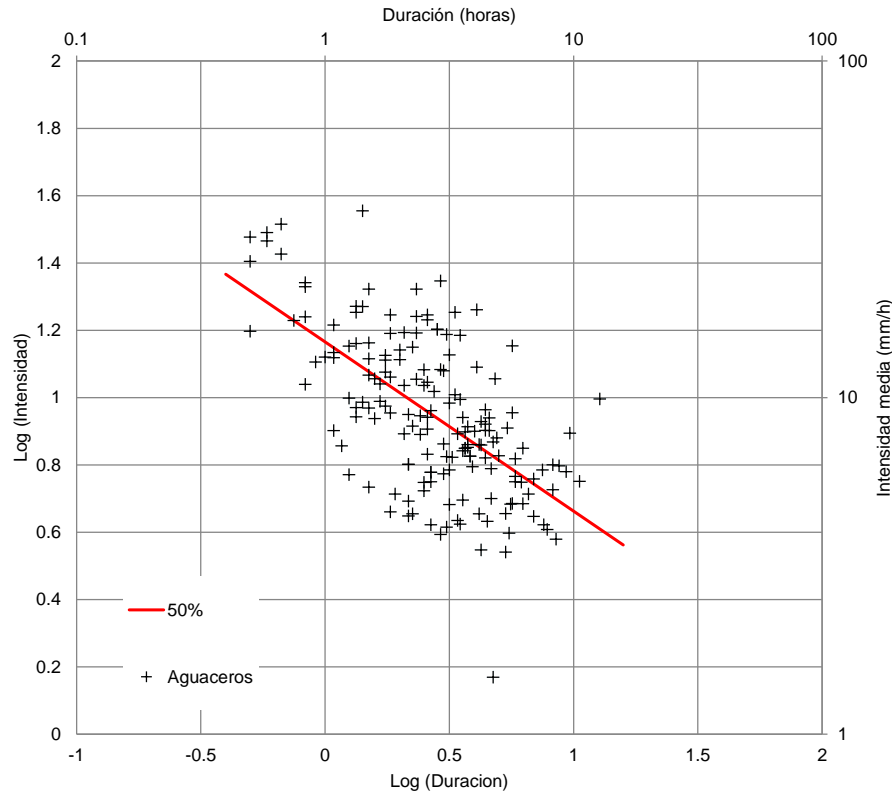


Figura 127. Eventos de lluvia que generaron deslizamientos

Como segundo paso, para cada evento de lluvia, se calcula la diferencia $\delta(D)$, entendida como la diferencia entre el logaritmo de la intensidad del evento $I(D)$, y el correspondiente logaritmo obtenido mediante la regresión $I_r(D)$

$$\delta(D) = \log[I(D)] - \log[I_r(D)]$$

La función de densidad de probabilidad para la distribución de δ puede estimarse mediante algún método (kernel density estimation) y al resultado puede asignarse un modelo Gaussiano mediante el método de los mínimos cuadrados. La Figura 158 muestra el ajuste a un modelo de distribución normal (línea continua) y la función de densidad de probabilidad de los datos (línea punteada).

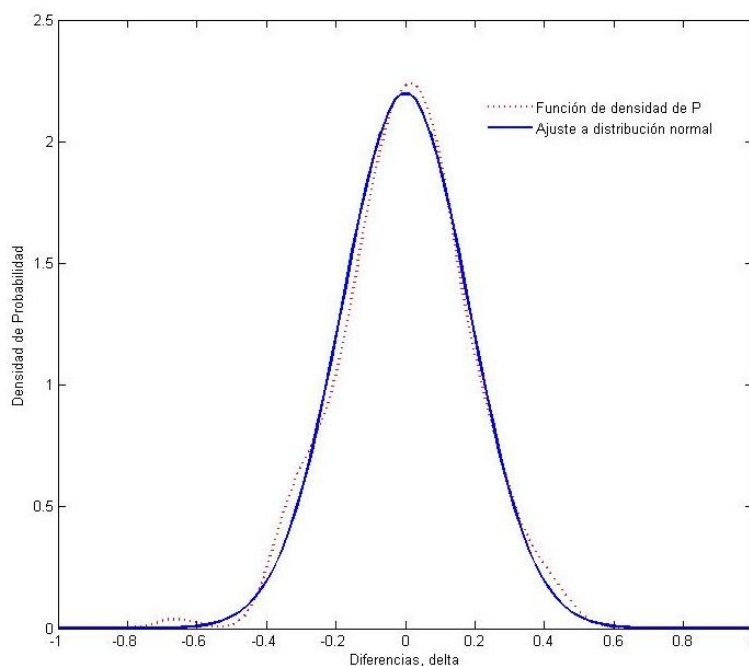


Figura 128. Estimación de la curva de densidad de probabilidad para las diferencias δ

Como último paso, pueden obtenerse umbrales para diferentes probabilidades de excedencia, a partir del modelo normal encontrado para las diferencias δ (D).

Como ejemplo se han obtenido dos umbrales (Figura 159), correspondientes a una desviación estándar y dos desviaciones estándar. El primero (línea verde) implicaría una probabilidad de experimentar deslizamientos al exceder el umbral de 97.7% y el segundo (línea azul) de 84%. También se presenta en la línea negra el modelo de regresión calculado, que correspondería a un umbral de 50% de probabilidad de experimentar deslizamientos al ser excedido.

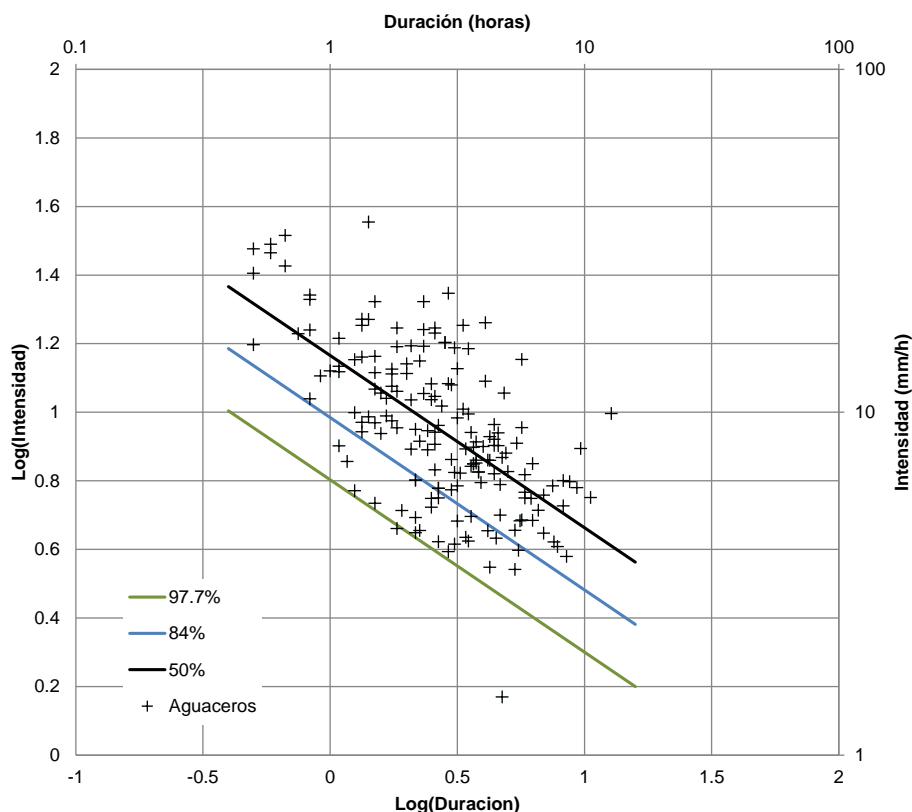


Figura 129. Estimación de umbrales Intensidad-Duración para la ciudad de Manizales

Las ecuaciones de los umbrales obtenidos se presentan a continuación y las curvas correspondientes aparecen en la Figura 130.

Umbral de 50%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 50%:

$$I = 14.642 D^{-0.5026}$$

Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 84%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 16%:

$$I = 9.6434 D^{-0.5026}$$

Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 98%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 2%:

$$I = 6.3513 D^{-0.5026}$$

Como método de verificación, en la Figura 131 se ubicaron los puntos correspondientes a los 9 aguaceros asociados a deslizamientos ocurridos en el segundo semestre de 2013; todos ellos quedaron por encima del umbral medio calculado.

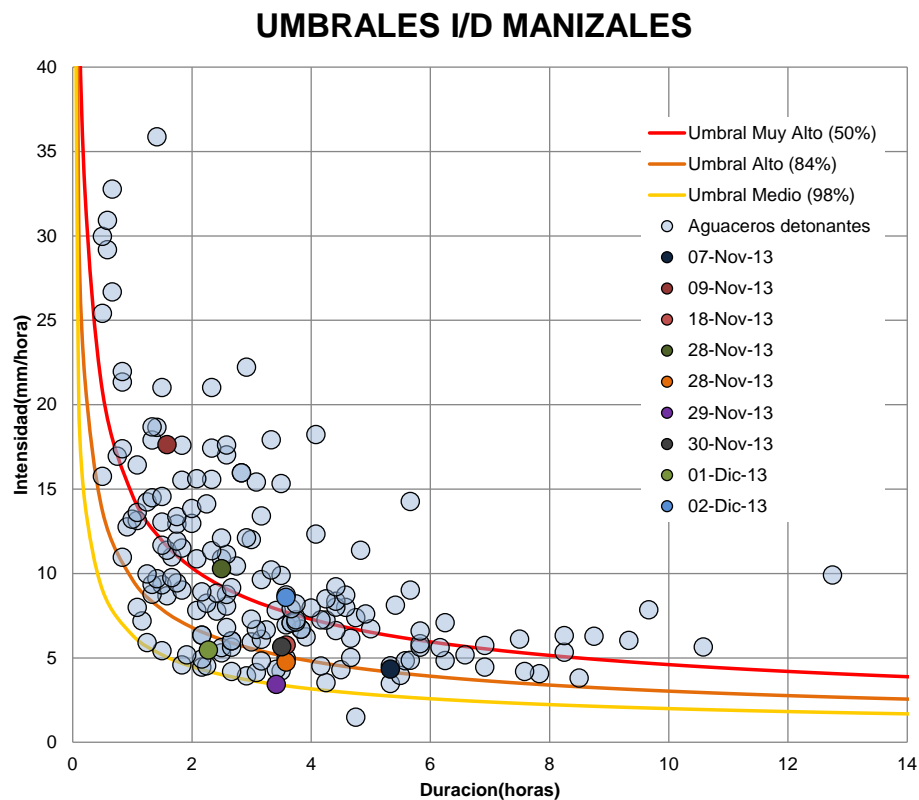


Figura 130. Umbrales ID propuestos para Manizales

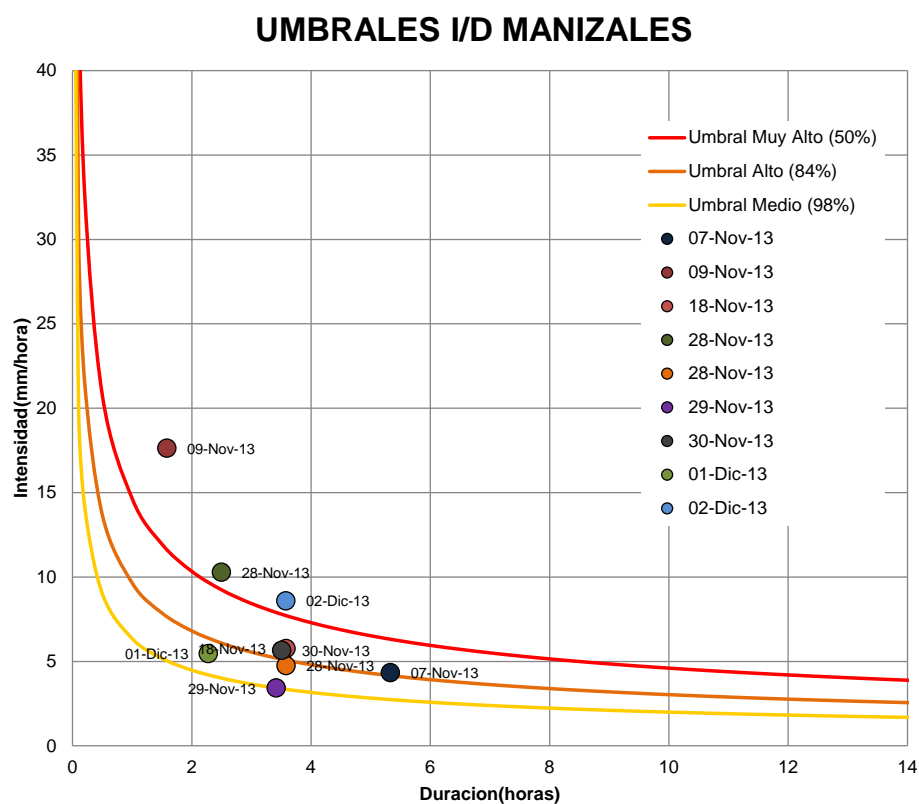


Figura 131. Aguaceros del segundo período lluvioso de 2013 que generaron deslizamientos

4.7.2. Umbrales de lluvia antecedente al evento de deslizamiento

A través de los registros pluviométricos históricos de la estación Postgrados, se obtuvo también la media de la precipitación que se registra anualmente “Precipitación anual media MAP”, y los días promedio en los cuales se registra lluvia, “Número promedio de días de lluvia RDS”. La precipitación anual media se obtiene como el promedio aritmético de los registros de lluvia diaria obtenidos por estación. Los resultados se presentan en la Tabla 65. El número promedio de días se estableció como el número de días en los cuales se registra lluvia mayor a 0.1 mm, sobre los días totales de registro. Estos valores serán útiles en análisis de lluvia antecedente posteriores.

Tabla 65. Valores medios de precipitación estación Postgrados.

MAP (Mean annual precipitation)		RDS (Average number of rain days)		
Año	MAP(mm)	RDS %	Días lluvia > 0.1mm	Días totales registro
2003	4.95	58%	193	334
2004	3.81	63%	192	305
2005	5.96	65%	236	365
2007	5.53	69%	252	365
2008	7.43	80%	292	366
2009	4.70	64%	232	365
2010	6.25	71%	260	365
2011	7.47	75%	275	365

Para establecer los umbrales de lluvia antecedente se generó un nuevo filtrado, eliminando eventos mínimos, con el criterio de la precipitación anual media; multiplicando el valor MAP por el número de días de la lluvia antecedente, para omitir registros que se ubican por debajo de dicho valor, por ser considerados dentro de los valores promedio, y por consiguiente no constituir un evento notable.

Como ejemplo se presentan en la Figura 132 las curvas de lluvia antecedente para la estación de postgrado, considerando los eventos que quedan después de filtrar por el MAP para 25 días (110 eventos); los valores están ordenados de menor a mayor según los valores de precipitación antecedente de 25 días.

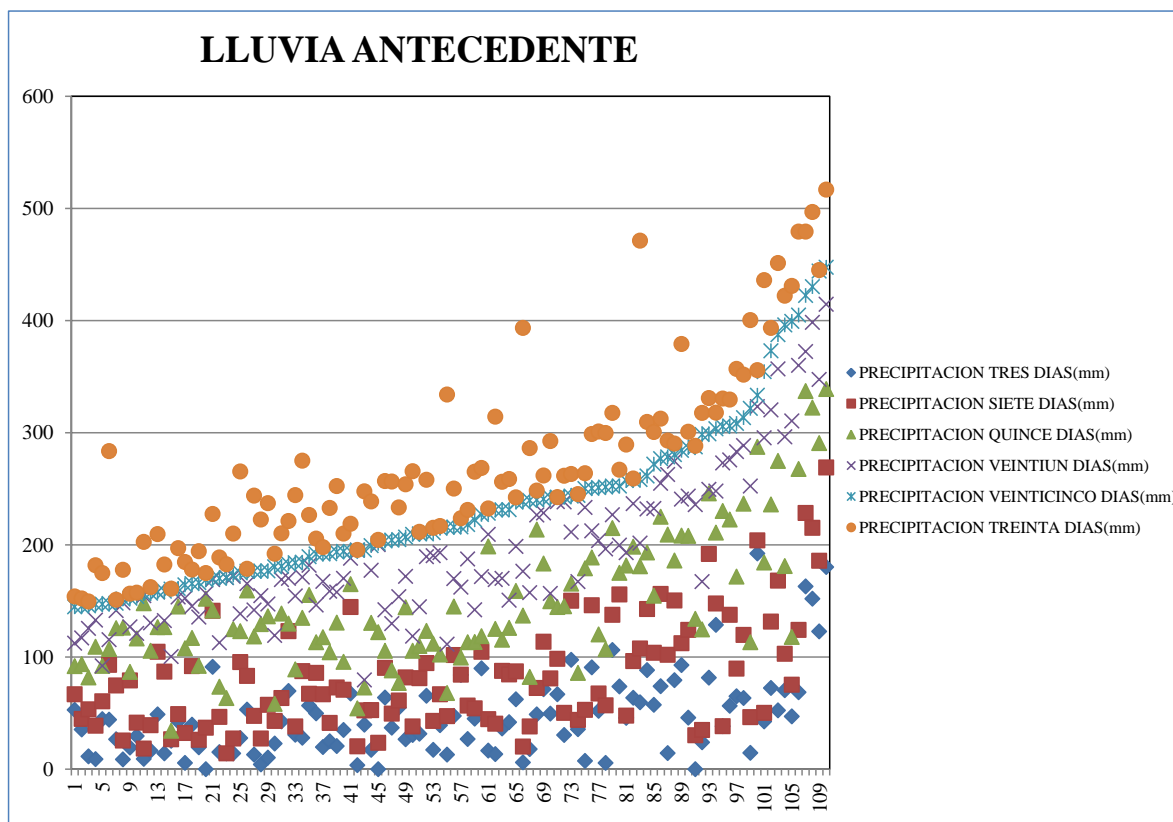


Figura 132. Gráfico de lluvia antecedente

Del gráfico es claro que los deslizamientos se tienden a presentar a partir de cierto “umbral mínimo” de lluvia, oscilando en torno a cierto valor, aunque con algunos eventos de magnitud alta al lado derecho del gráfico. Por este motivo, se optó por desarrollar un tratamiento estadístico de los datos para establecer los umbrales de lluvia detonante.

En la Figura 133 se muestra la curva correspondiente a los datos disponibles, utilizando una aproximación tipo kernel (línea punteada). A cada serie de lluvia antecedente se asignó una Función de Densidad de Probabilidad. En este caso se ha utilizado la familia Generalized Extreme Value Distribution (usada para modelar valores extremos de eventos independientes – en este caso, aguaceros) y específicamente la distribución de Frechet.

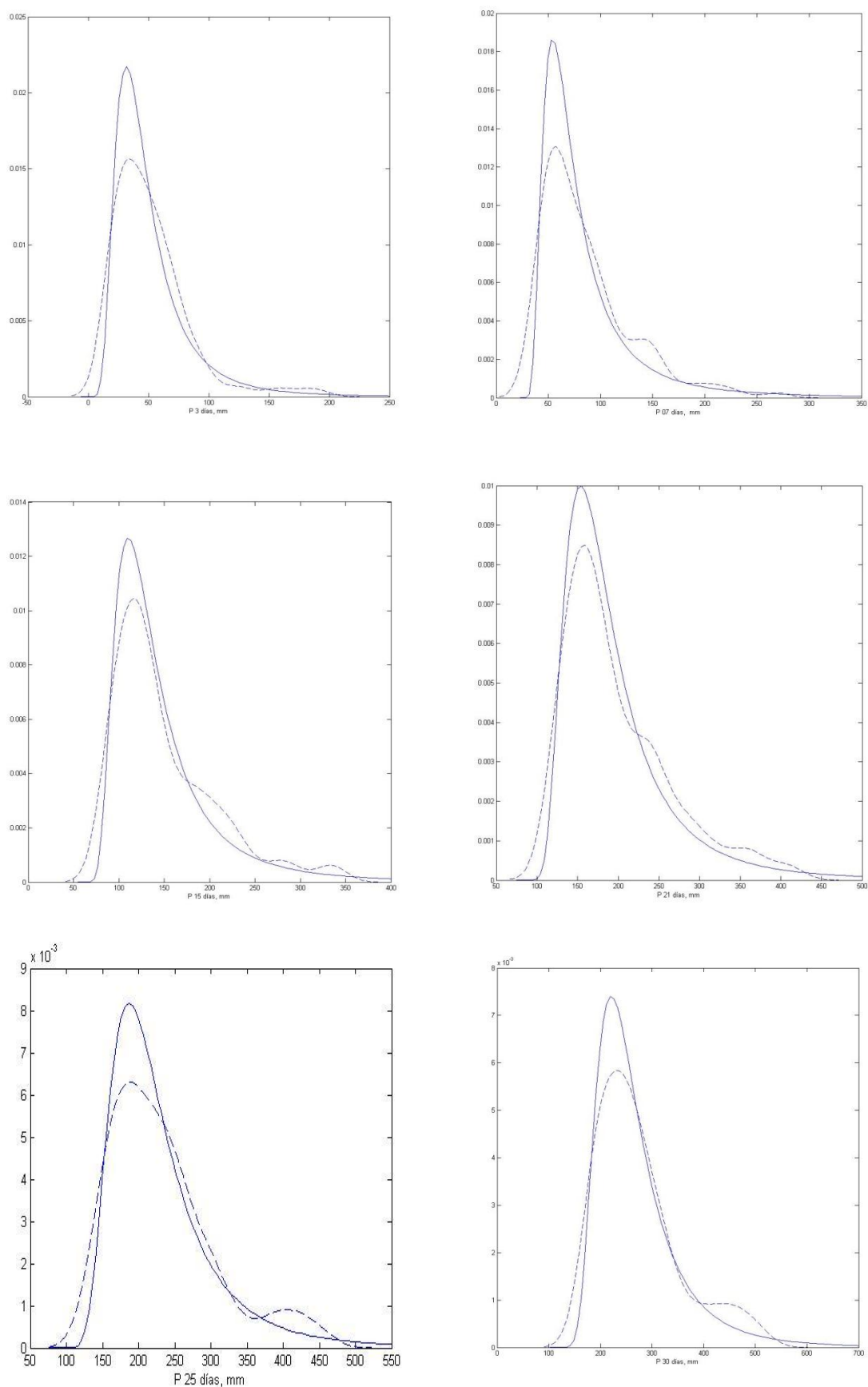


Figura 133. PDF de precipitación antecedente

En la Tabla 66 se presentan los parámetros asociados a las diferentes Funciones de Densidad de Probabilidad asociados a cada período de lluvia antecedente.

Finalmente, como umbral mínimo para 25 días, se ha seleccionado el valor correspondiente a $\mu - 1\sigma$. De la revisión de los valores de varianza, se concluye que el umbral para 25 días es el más adecuado, y su valor aproximado por este método es de 149 mm.

Tabla 66. Parámetros de la PDF para varios períodos de lluvia antecedente

Lluvia antecedente	shape parameter, k	scale parameter, sigma	location parameter, mu	mean	variance	mu - sigma
30d	0,218	50,796	230,569	273,670	9408,982	179,774
25d	0,213	45,996	195,394	234,106	7547,941	149,397
21d	0,296	38,328	163,380	201,190	8490,962	125,052
15d	0,352	30,681	119,013	152,887	8404,197	88,332
7d	0,453	21,589	61,514	91,296	17145,850	39,925
3d	0,281	17,566	35,785	52,584	1606,602	18,219

4.8. Valoración de pérdidas

4.8.1. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos

La probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un sitio particular está dada por la expresión

$$\Pr_L = \Pr_S \cdot \Pr(U > u)$$

Donde \Pr_S es la susceptibilidad y $\Pr(U > u)$ es la probabilidad de que el umbral detonante sea excedido.

Dado que el evento detonante está modelado como un conjunto de eventos estocásticos, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos puede calcularse para cada uno de esos eventos, teniendo cada evento la probabilidad temporal o frecuencia anual de ocurrencia dada por el evento detonante. De esta manera, es posible construir un conjunto de escenarios de amenaza por deslizamiento, donde cada escenario tiene la misma frecuencia anual que el detonante y está definido por dos momentos estadísticos: la media y la varianza.

Este conjunto de escenarios se elabora con el paquete de software ERN-LluviaNH, (CAPRA, 2012) a partir de un análisis histórico de la precipitación en la cuenca donde se inscriba el área de análisis y otras consideraciones adicionales. Para este trabajo se ha analizado la información pluviométrica disponible en la cuenca del río Chinchiná con una longitud histórica de 30 años. La Figura 134 presenta el mapa de precipitación anual multianual obtenido para la zona urbana de Manizales.

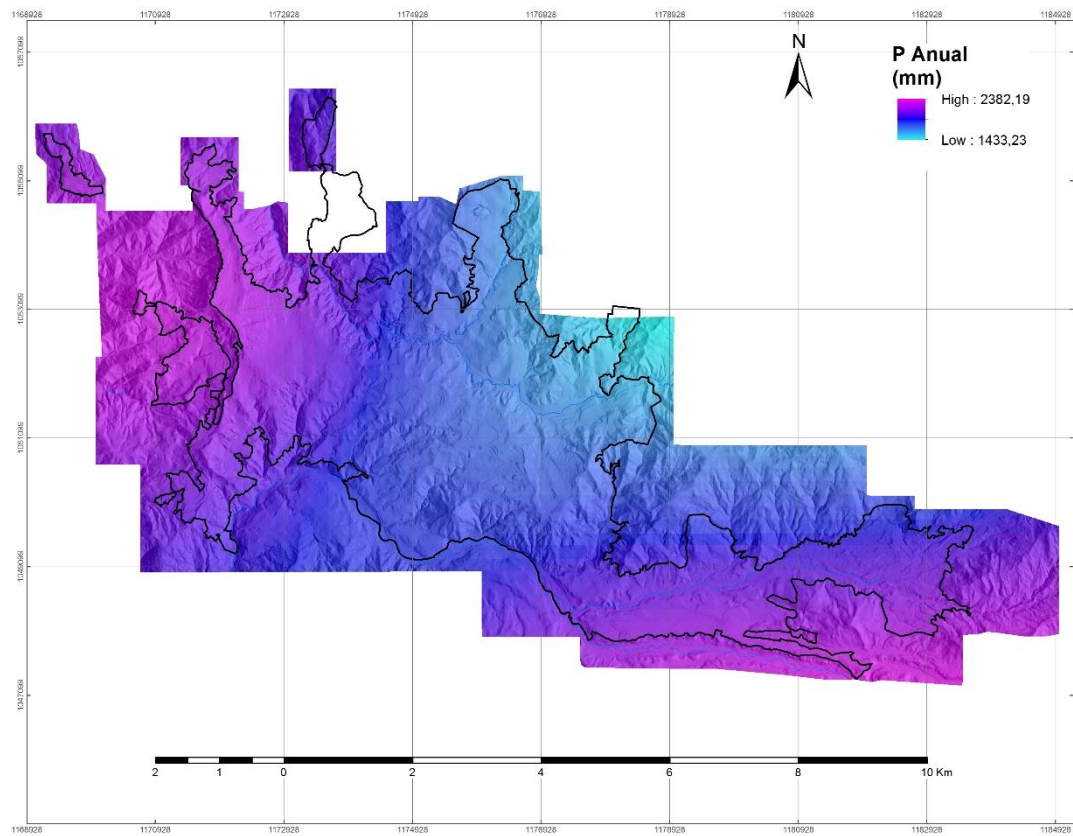


Figura 134. Precipitación anual multianual para la zona de estudio

En términos de tasa anual de ocurrencia de deslizamiento, la expresión general puede escribirse como la suma para cada escenario de la probabilidad de deslizamiento, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del escenario.

$$vL = \sum_{i=1}^N \Pr(U > u|E_i) * F_i * Pr_S$$

Esta expresión proporciona una representación probabilista de la amenaza de deslizamiento en términos de tasa de ocurrencia. El período de retorno se puede obtener como el inverso de la tasa anual de ocurrencia. La Figura 135, presenta la tasa anual de ocurrencia de deslizamientos obtenida para la ciudad de Manizales. En términos prácticos, el mapa está indicando cuantas veces por año, en promedio, ocurren deslizamientos en cada ubicación.

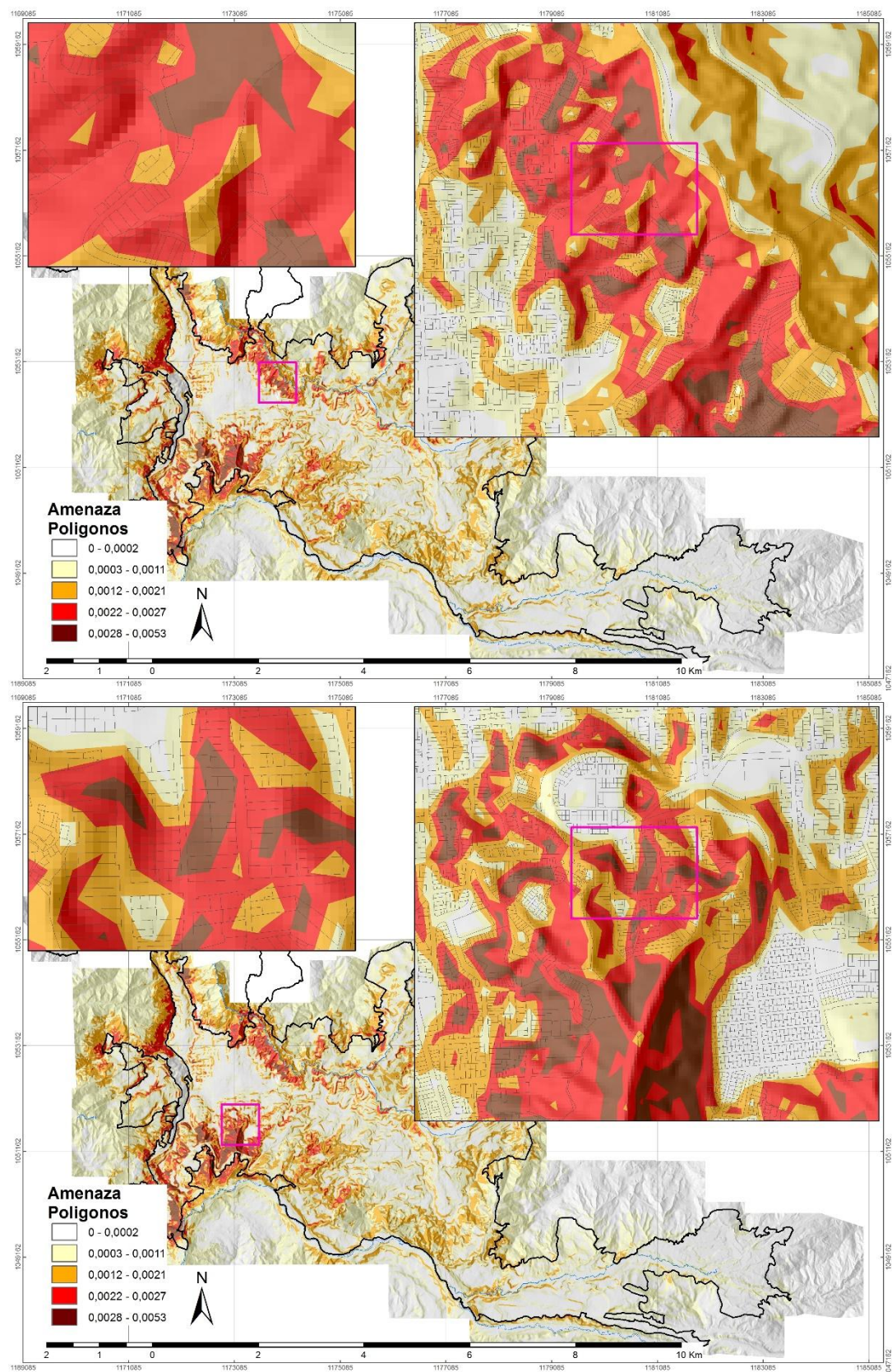


Figura 135. Tasa anual de excedencia (Amenaza) de deslizamientos para la ciudad de Manizales

Otra representación posible es obtener la amenaza como probabilidad de ocurrencia, integrando la tasa anual de ocurrencia en una ventana de tiempo dada (tiempo de exposición), mediante la siguiente expresión:

$$P_{\text{exposición}} = 1 - e^{(-\text{exposición} * \text{Tasa}_{\text{ocurrencia}})}$$

Como ejemplo se presenta la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 50 años (Figura 136), nótese que la escala ahora está dada en porcentaje o probabilidad.

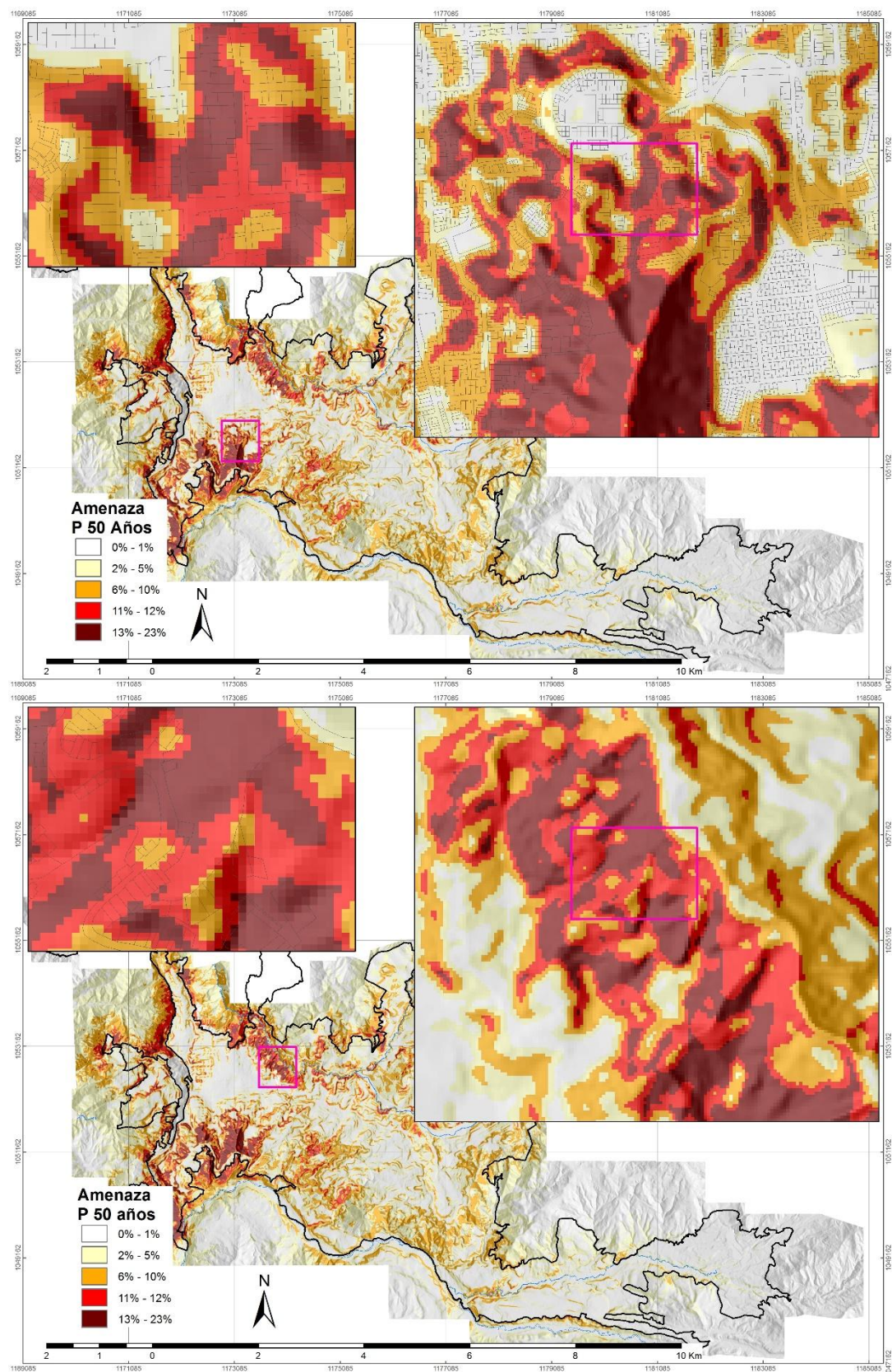


Figura 136. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 50 años

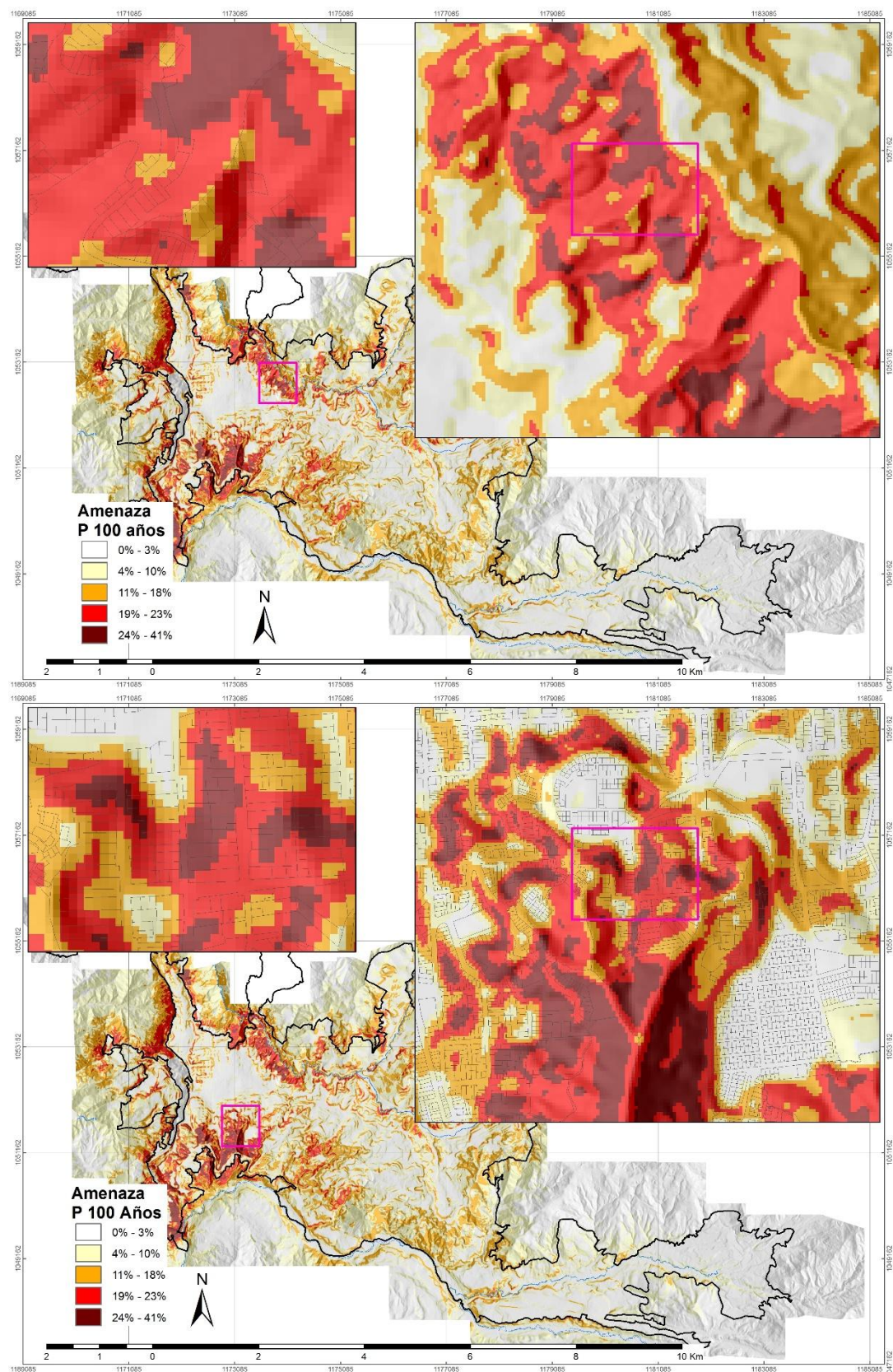


Figura 137. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 100 años

En el caso de deslizamientos, se parte del hecho que las áreas expuestas a los mayores niveles de amenaza presentarán a su vez los mayores niveles de daño. De esta manera, la vulnerabilidad de cualquier elemento expuesto puede considerarse total. En otros términos, cuando ocurre un

deslizamiento en la ubicación de un activo, todo su valor de reposición se pierde, independiente del tipo de elemento expuesto en cuestión, y del tipo, magnitud, volumen o velocidad del deslizamiento.

Puesto que se requiere un portafolio de elementos expuestos para cálculos de pérdida, se ha optado por utilizar el valor catastral de la base de datos predial disponible para el municipio. Con esta base de datos se ha elaborado un modelo de exposición (en términos monetarios) tipo ráster (de 5m x 5m) que expresa el valor expuesto para cada punto del terreno municipal, como se representa en la Figura 138.

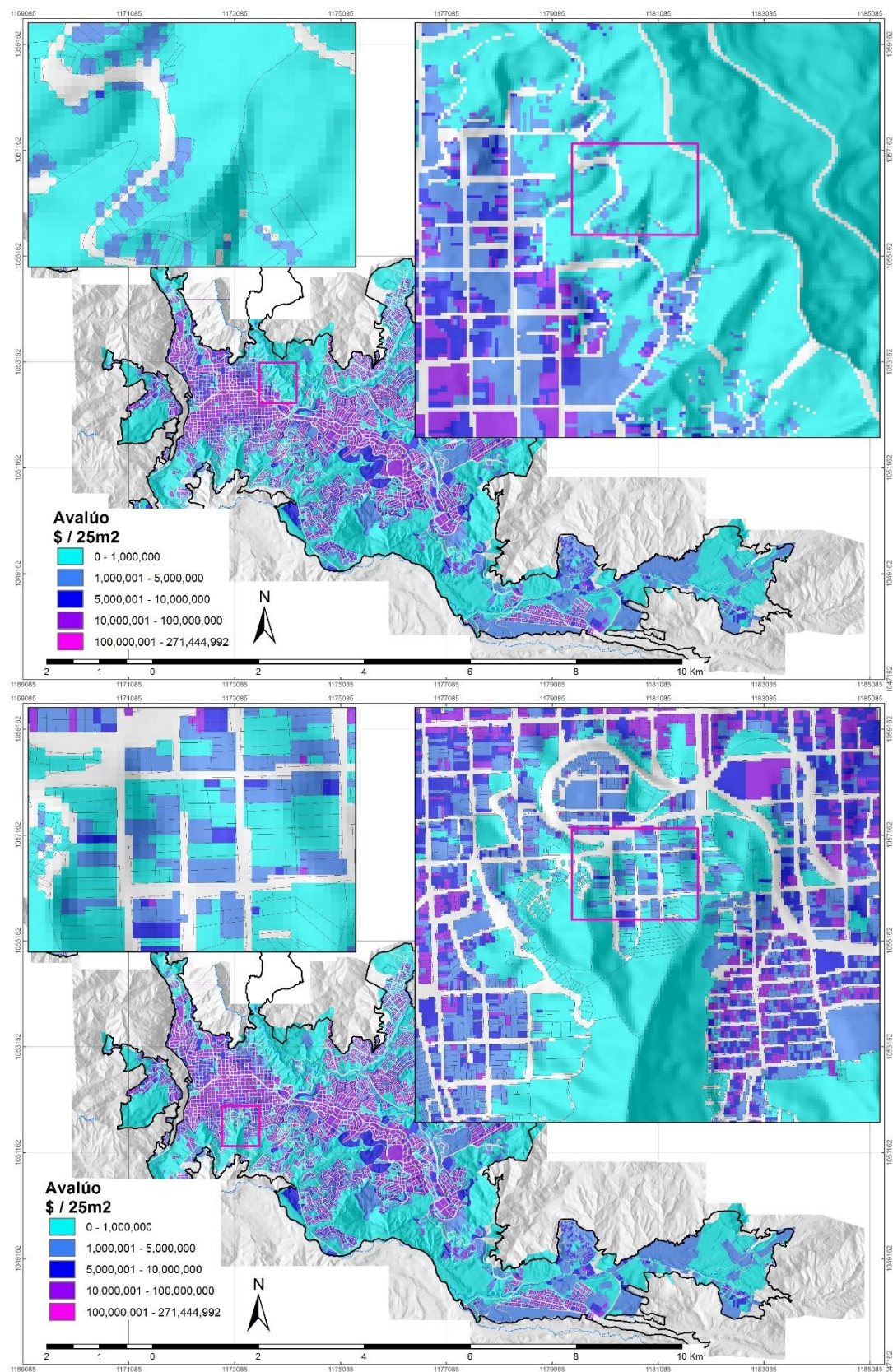


Figura 138. Modelo de exposición en términos monetarios

En el caso de habitantes expuestos, también es posible llegar a un modelo de exposición por píxel como el representado en la Figura 139.

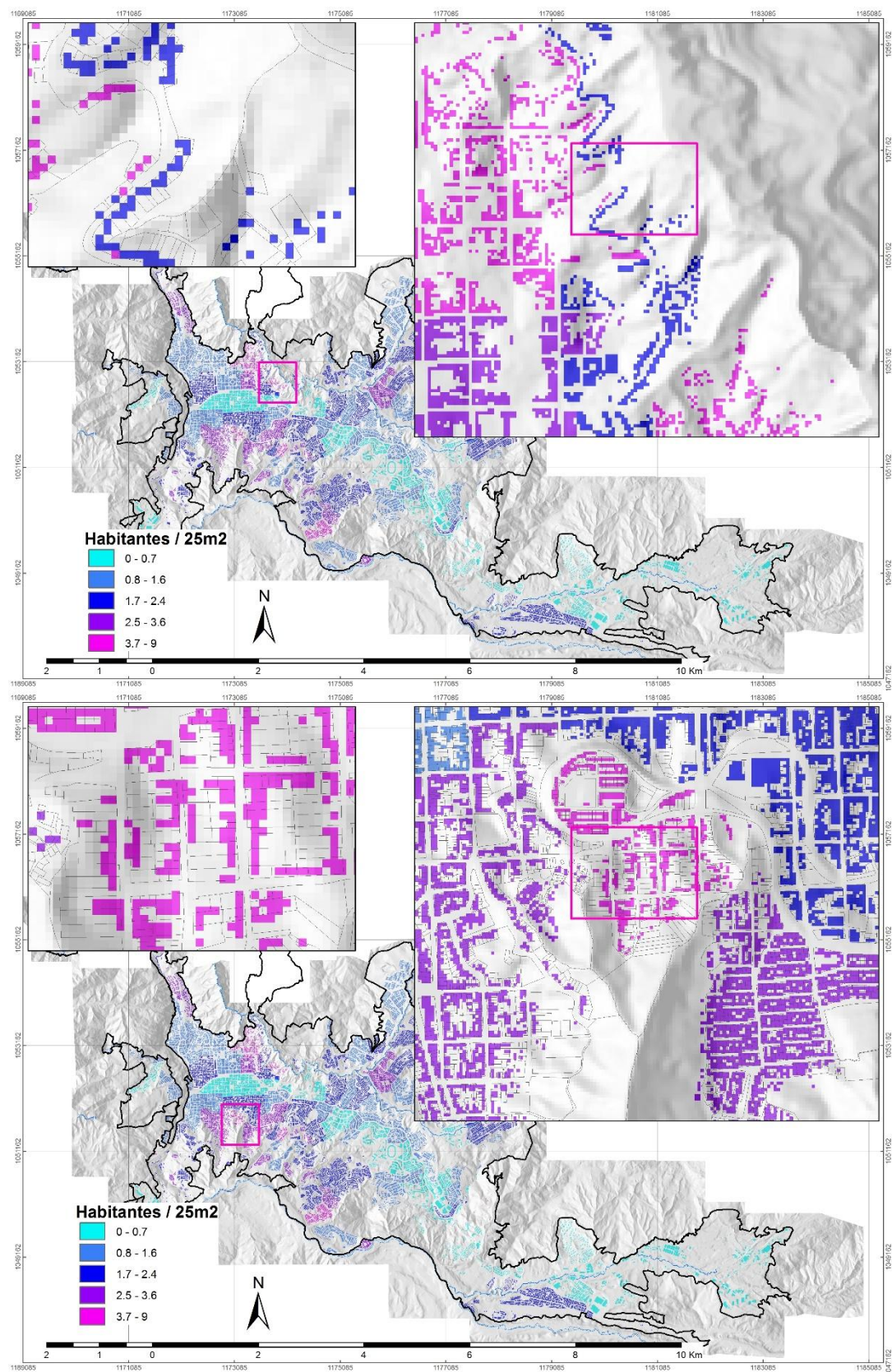


Figura 139. Modelo de exposición de habitantes

4.8.2. Pérdidas esperadas

La combinación de los modelos de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y los modelos de exposición, proveen la probabilidad de pérdidas en las mismas ventanas de tiempo. De esta forma se han generado mapas de pérdidas económicas esperadas en 50 años (

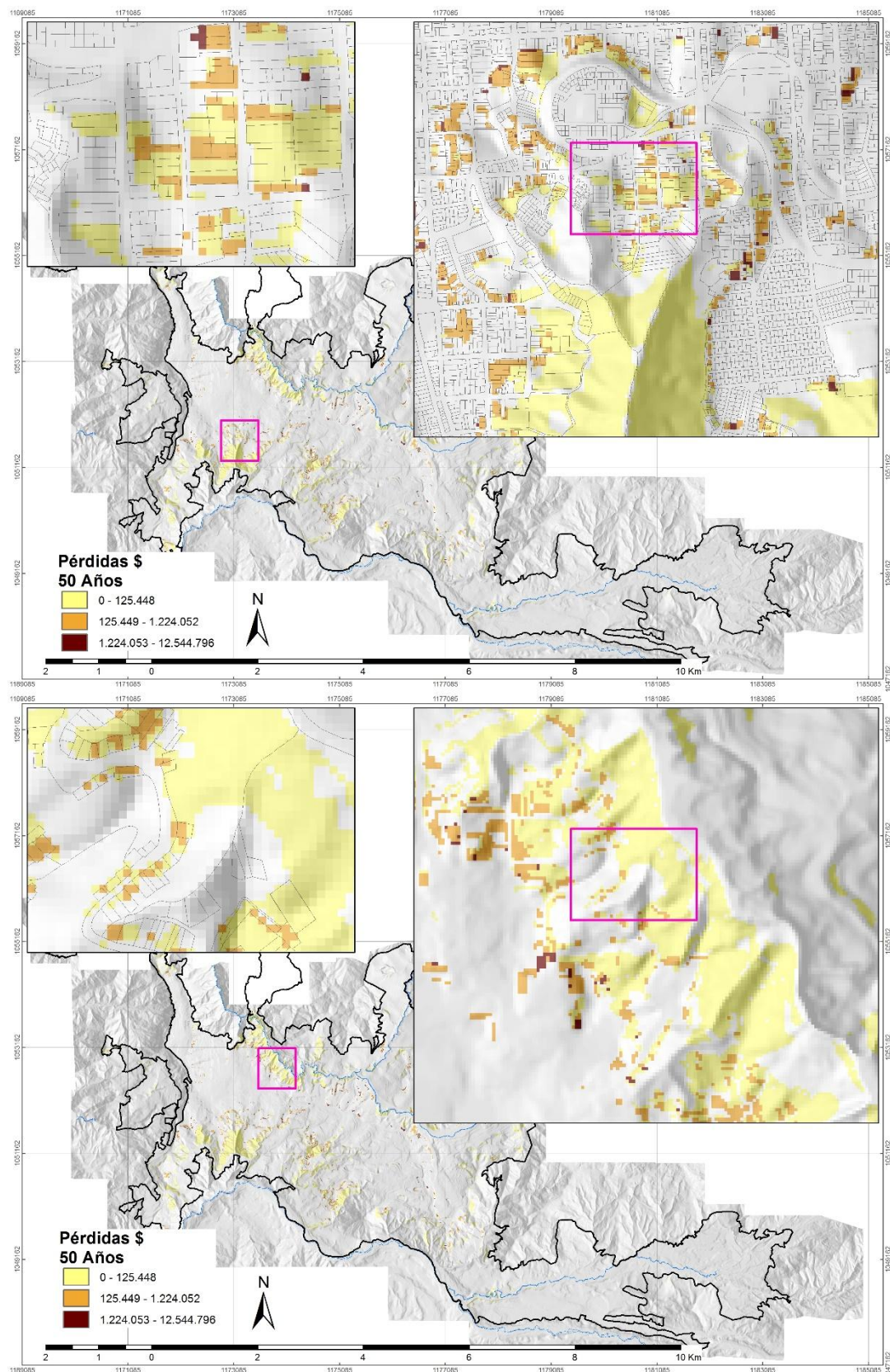
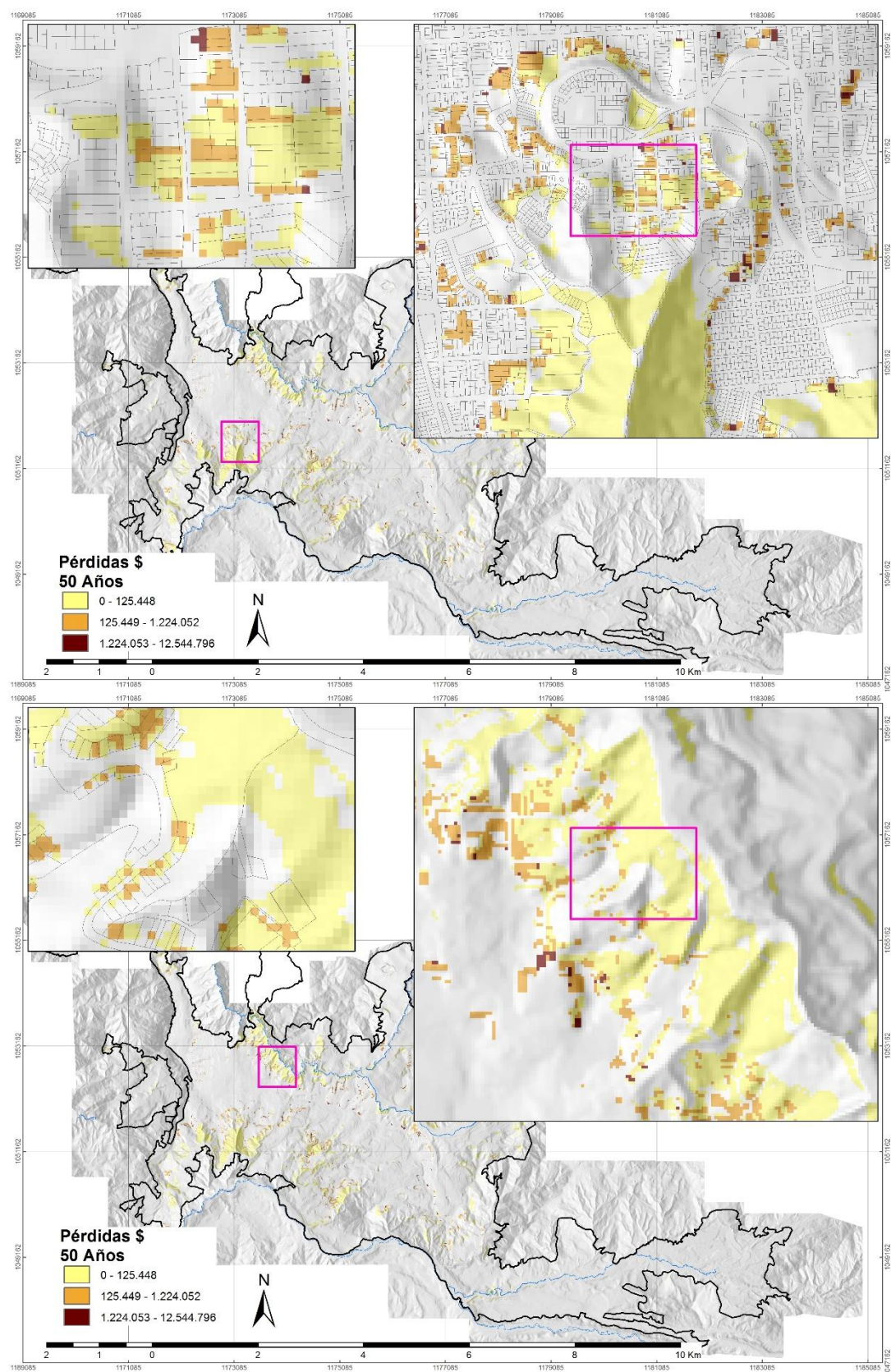
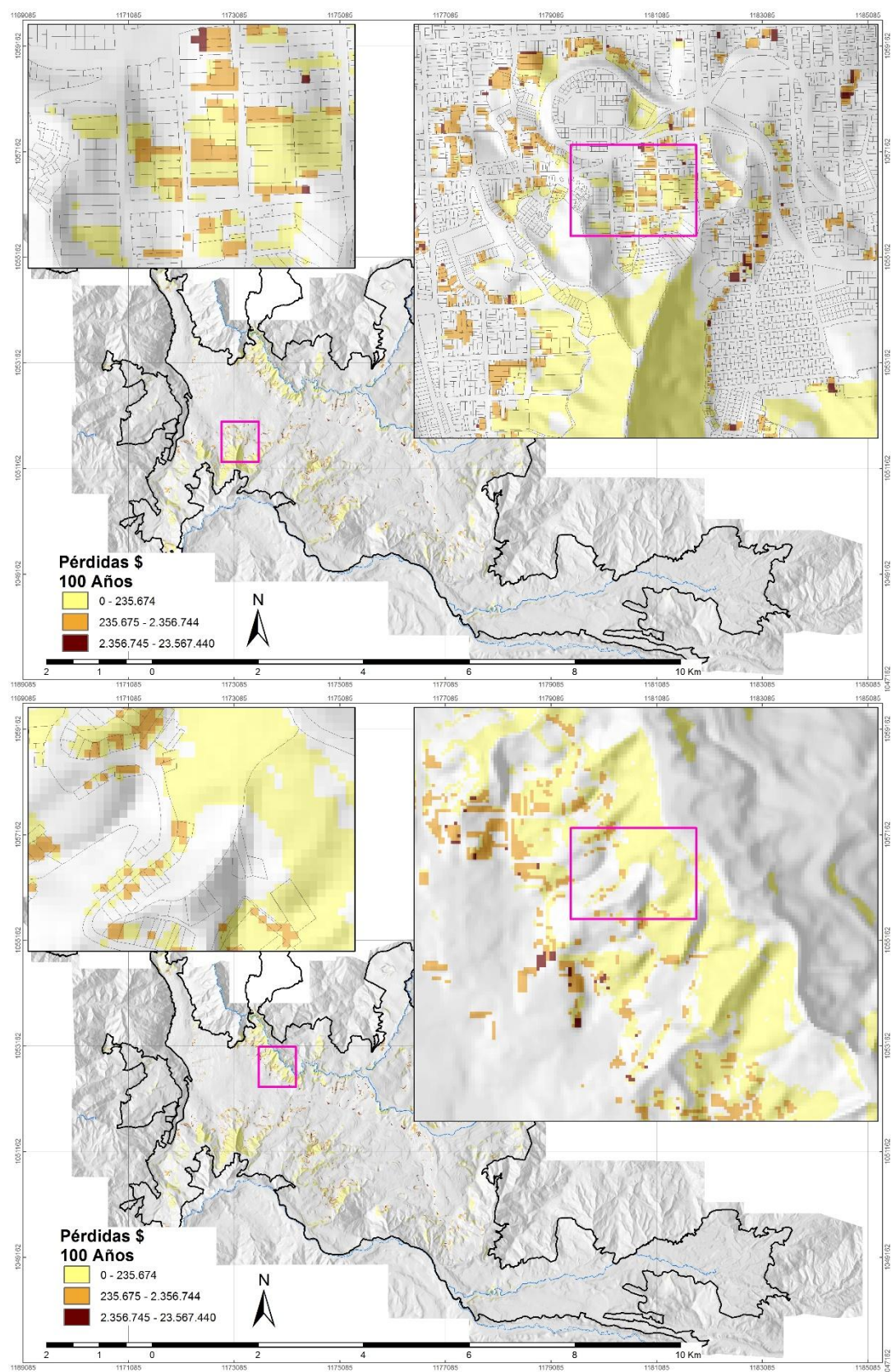


Figura 140) y 100 años (Figura 141) y de pérdidas humanas esperadas en 50 años (Figura 142) y 100 años (Figura 143).

La aplicación en evaluaciones de beneficio/costo de este tipo de enfoques resulta evidente: puede obtenerse el mapa de pérdida económica para una situación particular (actual, por ejemplo), luego puede evaluarse la construcción de determinadas obras de mitigación (que reducen los niveles de amenaza por deslizamiento) y asignar a ello un costo y recalcular las pérdidas esperadas bajo esta nueva configuración. Con lo anterior, y evaluando diferentes alternativas de mitigación, sería factible hacer análisis beneficio costo que permitieran establecer la viabilidad o no de la construcción de obras de mitigación, ya sea en términos económicos, o de protección de la vida de los habitantes de la ciudad.





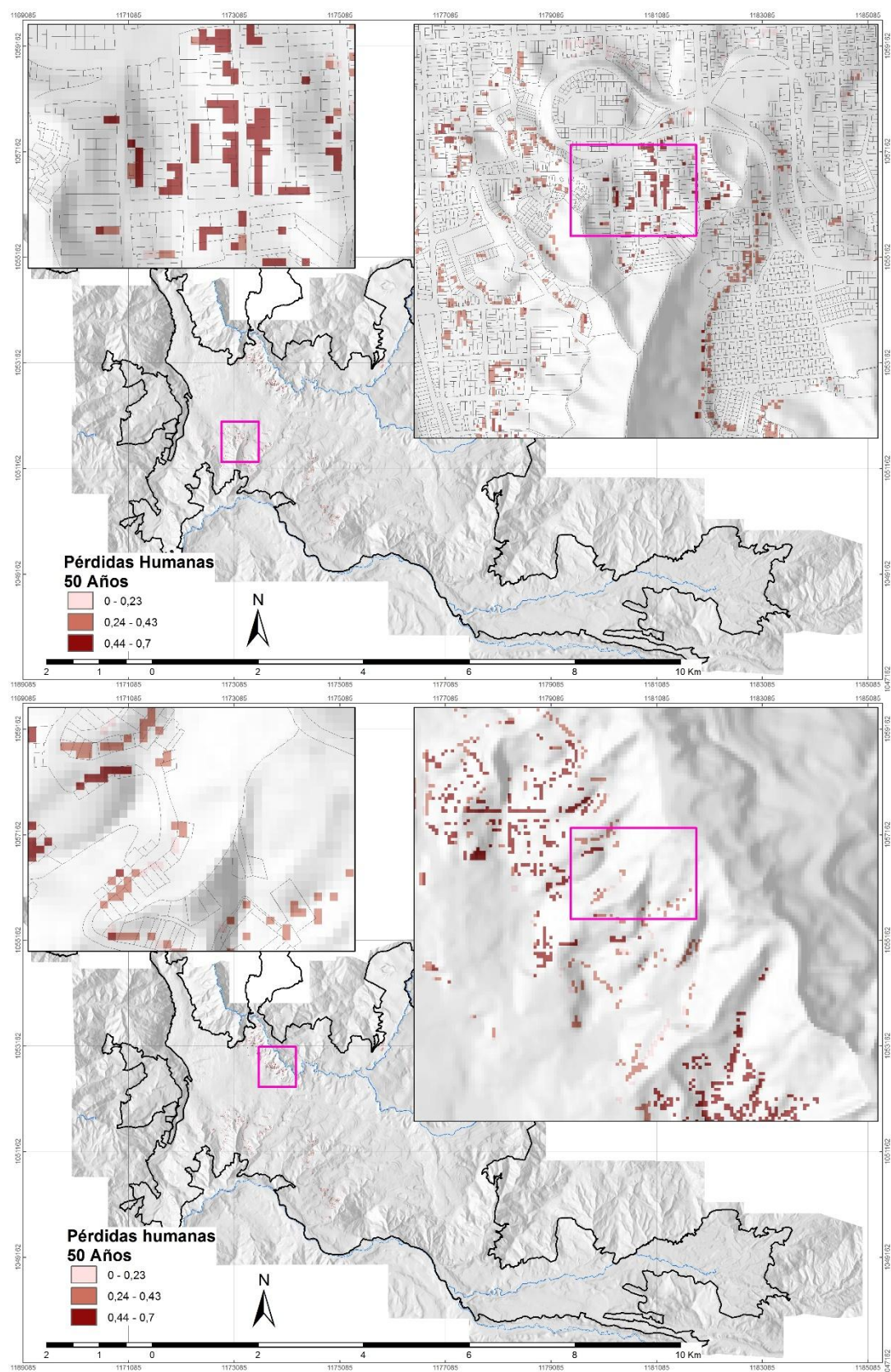


Figura 142. Pérdidas humanas en 50 años

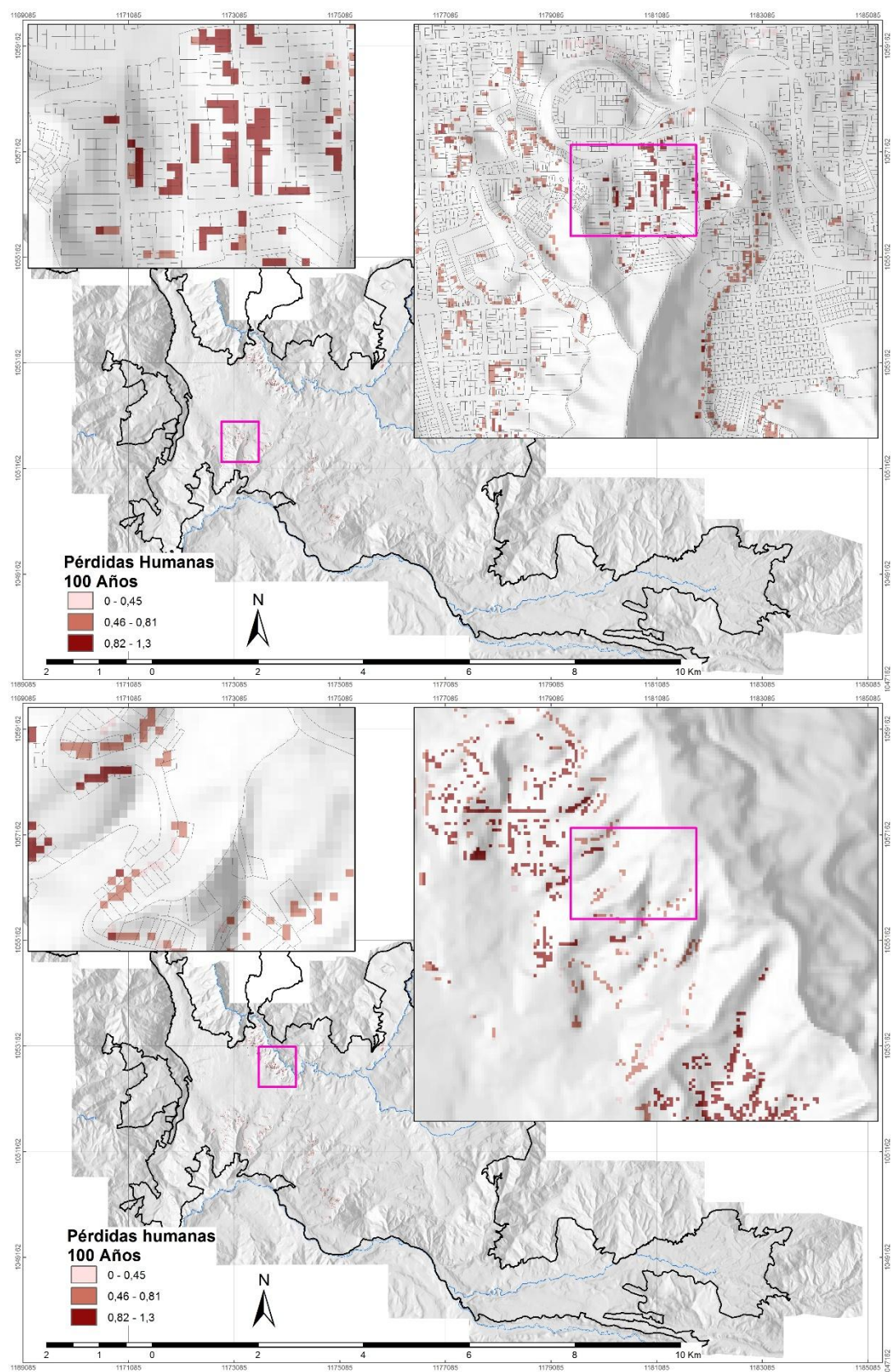


Figura 143. Pérdidas humanas en 100 años

4.9. Estrategias de mitigación para el control de deslizamientos urbanos.

Si comparásemos con las medidas existentes desde hace varias décadas para el caso sísmico, en materia de manejo de la amenaza por deslizamientos, faltan mecanismos de aseguramiento en cuanto a restitución de casas o negocios por pérdidas debidas a deslizamientos por parte de gobiernos locales, especialmente si es el caso de negligencia permitiendo o inspeccionando fallos en el desarrollo.

Estos elementos hacen emerger algunas preguntas generales: ¿Cuánta responsabilidad tienen los gobiernos locales en cuanto a garantizar que los desarrollos urbanísticos en áreas propensas a deslizamientos sean seguros?; ¿Qué nivel de riesgo asume el propietario eligiendo vivir o tener su negocio en una zona de alto riesgo?; ¿Cuál es la responsabilidad del constructor para asegurar que la ladera permanece estable?; ¿Es responsable el gobierno local de educar a los propietarios sobre paisajismo o disposición de aguas?.

Existen tres opciones básicas de gestión, disponibles para los tomadores de decisiones que se enfrentan a la amenaza de deslizamiento en zonas urbanas:

1. No ejercer acciones, antes ni después de la actividad de deslizamientos.
2. Proveer asistencia y esfuerzos de rehabilitación después de la ocurrencia de deslizamientos.
3. Por medio de acciones de mitigación, evitar o prevenir deslizamientos antes de que ocurran daños serios.

Antes de los años 50 prevalecían las primeras dos opciones. Sin embargo, como resultado de avances sociológicos y técnicos, el concepto de prevención de desastres por deslizamientos urbanos mediante gestión de uso del suelo o medidas de mitigación físicas, ha sido la práctica más efectiva.

Prerrequisitos para mitigación de amenazas urbanas

Los programas exitosos en reducción de amenaza de deslizamientos urbanos se basan en general en lo siguiente:

- Información técnica relacionada con la amenaza y riesgo por deslizamiento en la zona. Esta información debe contemplar: información digital, incluyendo imágenes, inventario de deslizamientos y mapas y reportes geológicos; información no digital, incluyendo mapas y reportes; reportes de investigación técnica, estimación de pérdidas y aplicación de medidas para remediar; datos de monitoreo en tiempo real de laderas; información climática y alertas de amenazas, y; manuales, videos y otro material de entrenamiento.

- Una comunidad técnica de geólogos, ingenieros y planificadores urbanos que estén en capacidad de utilizar y gestionar estos datos.
- Un gobierno municipal concientizado con el problema y con capacidad de gestión.
- Una población urbana que aprecie el valor de la prevención y apoye un programa de reducción de amenaza

Gobiernos locales en muchos casos han desarrollado programas de reducción de amenaza por deslizamiento, que tienen valor para otras organizaciones públicas y privadas y sirven de ejemplo. Tal es el caso del estado de Colorado, que bajo financiación de FEMA (US Federal Emergency Management Agency) ha producido un informe que propone reducir las pérdidas por deslizamiento mediante:

- Determinación de recursos locales, planes y programas que puedan ayudar en la reducción de pérdidas por deslizamiento.
- Identificar necesidades locales que deban atenderse para reducir pérdidas por deslizamiento.
- Identificar y desarrollar agencias estatales que puedan atender las necesidades locales.
- Educar a funcionarios locales y estatales y personal de atención de emergencias en la amenaza por deslizamiento, métodos potenciales para reducción de pérdidas. Las comunidades deben estar convencidas que entre sus intereses debe estar el evitar efectos y repercusiones de los eventos de deslizamiento.
- Generar proyectos eficientes de mitigación de amenaza que reduzcan las pérdidas por deslizamiento.

En cuanto a otros ejemplos de publicaciones relacionadas con gestión de deslizamientos urbanos, las ciudades de Cincinnati, Ohio, (Hamilton County Regional Planning Commission 1976) y Portola Valley, California también han preparado planes similares. Una guía completa orientada a gobiernos locales y estatales para reducir pérdidas por deslizamientos fue financiada y publicada por FEMA (Wold and Jochim 1989). La American Planning Association ha publicado un manual titulado "Landslide Hazards and Planning" (Schwab et al. 2005) que se enfoca principalmente en la reducción de pérdidas por deslizamiento.

Enfoques para mitigación de la amenaza por deslizamiento

Un desarrollo cuidadoso de las laderas puede reducir pérdidas económicas y sociales causadas por fallos en las mismas, evitando amenazas potenciales, reduciendo el daño potencial, y o alertando a la población en riesgo.

El riesgo de deslizamiento en áreas urbanas puede reducirse principalmente mediante cuatro enfoques regulatorios (Kockelman 1986; Schuster and Kockelman 1996):

1. Restringiendo el desarrollo en áreas urbanas susceptibles a deslizamientos, con el apoyo de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos;
2. Requiriendo, por medio de códigos, que los movimientos de tierras (grading), excavaciones, perfilado, construcción, intervenciones de la vegetación, y actividades de drenaje, no contribuyan a la inestabilidad de laderas;
3. Protegiendo los desarrollos existentes y a la población mediante medidas físicas de mitigación, como modificaciones en la geometría de los taludes, obras de drenaje, muros y barreras;
4. Desarrollando e instalando sistemas de monitoreo y alerta temprana.

Los primeros dos enfoques pueden ser promovidos explícitamente por la legislación pública. En Estados Unidos, esta legislación normalmente es jurisdicción de los gobiernos locales.

Adicionalmente, otros países que están sujetos a pérdidas por deslizamientos, han incorporado roles federales o provinciales en mitigación de la amenaza por deslizamiento para asegurar estándares prácticos consistentes en los niveles provincial, municipal y local (Swanston and Schuster 1989).

Estas medidas de mitigación, cuando se utilizan con tecnología actual, pueden reducir ampliamente las pérdidas debidas a deslizamientos. Schuster and Leighton (1988) estiman que este tipo de medidas pueden reducir las pérdidas en California más del 90% y la implementación de estas prácticas ha reducido las pérdidas en la ciudad de Los Ángeles entre 92-97%.

Restringir el desarrollo es, probablemente, el camino más económico y efectivo para reducir las pérdidas por deslizamiento. Esto es posible mediante planificación territorial, relegar laderas para espacios abiertos, parques y otros usos de baja densidad, buscando localizar los asentamientos en terrenos estables. Esta práctica de evasión del riesgo debe acompañarse por medidas para desincentivar, regular y prevenir nuevos asentamientos en laderas inestables, y remover o convertir los desarrollos actuales (Kockelman 1986). Donde no es una opción realista evitar totalmente el riesgo por deslizamiento, las comunidades a menudo adoptan políticas para intentar limitar el tipo y densidad de desarrollos en laderas para minimizar la exposición (Schwab et al. 2005).

Algunos métodos para desincentivar el desarrollo en estas áreas que han tenido éxito en los Estados Unidos son (U.S. Geological Survey 1982):

1. Adquisición de la propiedad por parte del gobierno: un camino seguro para prevenir la expansión en laderas es la de comprar las propiedades para usos pasivos, como espacio abierto o parques (Schwab et al. 2005). Una vez que la comunidad usa la propiedad, es posible controlar el

desarrollo para interés público, declarándola fuera de los límites de desarrollo. Las agencias del gobierno pueden prevenir nuevos desarrollos en propiedades en laderas adquiriendo estas áreas mediante compra, donación, ejecución fiscal

2. Suministrar información de amenazas por deslizamientos a compradores potenciales: los gobiernos locales pueden asegurarse que los registros públicos de usuarios de tierras urbanas incluyen información sobre amenaza de deslizamientos. Un mecanismo para desincentivar el desarrollo es promoviendo leyes que alerten a los potenciales compradores de la amenaza (Kockelman 1986). Otro enfoque es establecer desincentivos en situaciones donde puede permitirse desarrollo a pesar de la amenaza. Un ejemplo puede ser cuando un gobierno urbano permite el desarrollo en zonas con cierta susceptibilidad, con el compromiso que el urbanizador debe revelar a los compradores que están adquiriendo terrenos con amenazas potenciales (Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy 2004). Como ejemplo, Santa Clara County, California, requiere que cada urbanizador, dentro de las zonas de fallas, inundaciones y deslizamientos, proporcione a los compradores potenciales, declaraciones escritas de la amenaza geológica de la propiedad.

3. Limitar la inversión pública mediante la exclusión de infraestructura pública: muchos de los desarrollos privados dependen de la extensión de la infraestructura pública, como líneas de agua potable y saneamiento, para su viabilidad económica (Schwab et al. 2005). Esto hace de las políticas de inversión pública una poderosa herramienta para dirigir el desarrollo lejos de áreas susceptibles a deslizamientos, y hacía otras zonas con menor amenaza. Los gobiernos municipales pueden prevenir la construcción de infraestructuras como las mencionadas de agua y saneamiento, calles y andenes en zonas susceptibles para prevenir o restringir el desarrollo de estas áreas.

4. Educación pública: un programa eficiente de control de uso del suelo requiere el apoyo de la población afectada. Así, un componente importante de la mitigación de amenaza por deslizamiento es compartir información relacionada con el público para aclarar significados. Cuando la comunidad es debidamente informada de la existencia de amenazas, pueden entender y asumir mejor las medidas de control de usos del suelo para evitar pérdidas.

5. Advertencias públicas de obligaciones legales: dueños de la propiedad y urbanizadores deben conocer las obligaciones legales en las que podrían incurrir en el evento en que se presenten daños debidos a deslizamientos.

6. Publicación de alertas, dirigidas por el gobierno local hacia los posibles propietarios y urbanizadores sobre la amenaza de deslizamiento.

7. Deducciones y contribuciones especiales: pueden ponerse a disposición de los dueños de propiedades que se ubican en zonas de alto riesgo créditos fiscales. Por otro lado, pueden imponerse tasas más altas para nuevos desarrollos urbanos en laderas.

8. Negar préstamos para construcción: las entidades de crédito pueden desalentar el desarrollo o construcción en terrenos propensos a deslizamientos negando préstamos para estos fines.

9. Costos de seguros prohibitivos: el alto costo de las pólizas o la inexistencia de cobertura para desarrollos urbanos en laderas pueden desincentivar este desarrollo y fomentar el uso de terrenos menos susceptibles.

La tabla muestra los requerimientos típicos de densidad de construcciones, en número de lotes por acre de terreno, según la pendiente, para áreas propensas a deslizamientos (Schwab et al. 2005)

Tabla 67. Densidades de urbanización sugeridas para áreas propensas a deslizamientos

Pendiente	Máximo número de lotes por acre
Hasta 10%	1.0
10-14.9%	0.9
15-19.9%	0.8
20-24.9%	0.7
25% o más	No permitido

En varios países se han desarrollado códigos de excavación, movimientos de tierras, y ordenanzas de construcción, para asegurar que la construcción en laderas sea diseñada y llevada a cabo en manera que no implique inestabilidad del terreno. Estas ordenanzas comúnmente presentan las siguientes características (Schuster 1991; Schuster and Kockelman 1996):

- a. Regulan, minimizan, o prohíben las excavaciones o llenos.
- b. Proveen diseños ingenieriles, construcción, inspección y mantenimiento de cortes y llenos.
- c. Proponen control de los drenajes naturales y vegetación; y
- d. Desarrollan diseños, construcción, inspección y mantenimiento de sistemas de drenaje superficial y subsuperficial.

4.10. Análisis De Resultados

4.10.1. Consideraciones Iniciales

Debe reconocerse que la zonificación de deslizamientos no es una ciencia precisa y los resultados son solo una predicción de comportamiento de laderas basada en los datos disponibles. Existen importantes fuentes de error en todo el proceso que merecen ser mencionadas (Fell et al. 2008):

- Limitaciones en el inventario de deslizamientos utilizado para hacer los análisis.
- Limitaciones en la estabilidad de las series temporales. Por ejemplo, la relación entre el factor detonante (lluvias) y la frecuencia de los deslizamientos puede cambiar si el área es deforestada.
- Limitaciones en el nivel de detalle disponible de los datos topográficos, geológicos, geomorfológicos, y otros datos de entrada.
- Incertidumbre en el modelo, representada por las limitaciones de los métodos usados para relacionar el inventario de deslizamientos con las demás variables de entrada, para predecir la susceptibilidad, amenaza y riesgo frente a deslizamiento
- Limitaciones en la habilidad de las personas para desarrollar los estudios.

4.10.1.1. Inventarios de deslizamiento:

Una importante fuente de error en susceptibilidad a deslizamientos proviene de limitaciones en el inventario de los mismos. Muchos errores provienen de inventarios basados en fotointerpretación de fotografías aéreas a pequeña escala (Fell et al. 2008). En el presente estudio se ha utilizado un inventario desarrollado por Corpocaldas, como un esfuerzo piloto, que sigue adelante, y es susceptible de mejorar. Como se comentó en la sección 2.3, se trata de mapas con la localización puntual de eventos de deslizamientos, obtenidos mediante trabajo de campo a través de georreferenciación de los diferentes lugares de ocurrencia. Evidentemente, una de las mejoras necesarias sería la confección de planos con la delimitación adecuada de los diferentes deslizamientos; así, además de su ubicación, se tendrían otros atributos importantes como las dimensiones y formas.

4.10.1.2. Mapas topográficos.

La topografía es un factor importante, del cual se derivan otros mapas, por lo tanto, influye marcadamente en la generación de modelos de susceptibilidad. En el caso particular de este trabajo, el modelo de terreno utilizado fue elaborado a partir del mapa de curvas de nivel (o contornos) cada dos metros, disponible para el área de estudio, lo cual ofrece la posibilidad de obtener una retícula de píxeles de 5 metros de ancho sin ningún tipo de inconveniente.

Para ilustrar las variaciones de los modelos de susceptibilidad a partir de cambios en la topografía se contó con dos sets de información topográfica para diferentes épocas: 2004 y 2010. Se aplicó el modelo de susceptibilidad obtenido con información de 2004 a la topografía de 2010, dando como resultado un modelo similar de zonificación (Figura 145). Las diferencias entre los dos modelos, cuando existen, obedecen a cambios de la topografía causados por modificaciones en las laderas. Nótese, por ejemplo, el área resaltada en la figura, que corresponde a una construcción reciente: en 2004 existía una obra de estabilidad con la forma mostrada en la Figura 144, mientras que en 2010, la topografía varió su forma a partir de la construcción, situación reflejada en las curvas de nivel de 2010 y el modelo de la Figura 145.

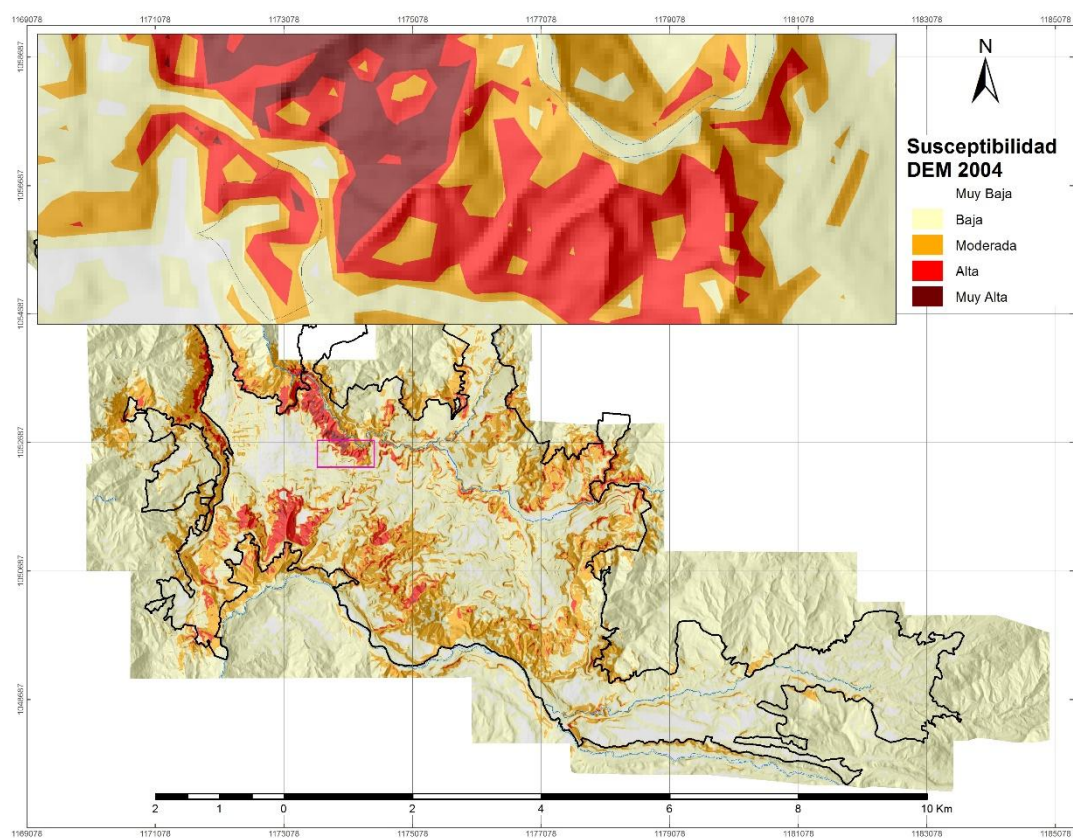


Figura 144. Modelo de susceptibilidad elaborado con la topografía de 2004

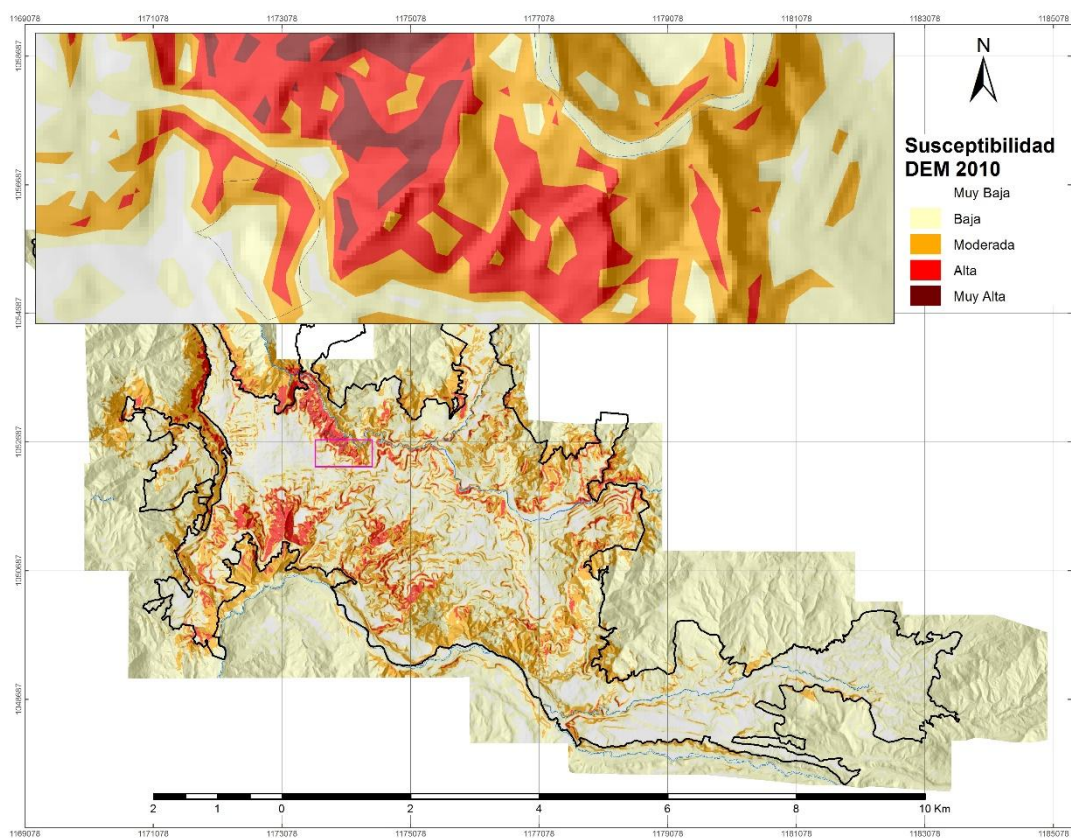


Figura 145. Modelo de susceptibilidad elaborado con la topografía de 2010

4.10.2. Parámetros de rendimiento general de los modelos

La revisión de los valores de clasificación sugiere niveles de ajuste de los diferentes modelos utilizados. Para realizar una análisis de las capacidades de clasificación de los diferentes modelos se ha tomado como punto de corte 0,5; es decir, valores de susceptibilidad por encima de 0,5 se consideran inestables, y valores por debajo, estables. Este supuesto, que puede considerarse neutro, se hace simplemente para fines comparativos entre modelos, y no constituye un valor de referencia fijo, siendo necesario aplicar parámetros de reclasificación específicos para dar calificativos de susceptibilidad, como se presentó en la Sección 4.2.

Para las muestras consideradas se han obtenido los parámetros correspondientes a verdaderos positivos (tp), verdaderos negativos (tn), falsos positivos (fp), falsos negativos (fn), y se han calculado los estadísticos correspondientes a eficiencia/precisión, sensibilidad, especificidad, coeficiente de Gilbert, coeficiente de Peirce, coeficiente de Heidke y coeficiente Odds Ratio. Adicionalmente se han elaborado gráficos comparativos con estos valores, y se han graficado los valores de clasificación obtenidos con los diferentes modelos y los respectivos valores del área bajo la curva, en el caso de puntos con deslizamientos, donde el valor debería acercarse a la unidad AUC_D, y en puntos estables, donde su valor debería ser cercano a cero AUC_E.

En el caso de la aplicación a la cuenca del río Chinchiná, la Tabla 68 muestra los valores de clasificación obtenidos, mientras la Tabla 69 presenta los correspondientes a la ciudad de Manizales.

Tabla 68. Parámetros de rendimiento para los diferentes modelos evaluados en la cuenca del río Chinchiná

	RNmean	RN05	RN04	RN03	RN02	RN01	RN03	RF04	RF03	RF02	RF01	IV04	IV01	IV02	IV03	G0750	G0950	G0975	G0990	G0900	FD01	FD02	FD03
AUC_D	0,843	0,890	0,879	0,879	0,837	0,846	0,852	0,714	0,805	0,818	0,826	0,812	0,876	0,877	0,875	0,841	0,839	0,841	0,831	0,840	0,882	0,881	0,883
AUC_E	0,221	0,236	0,219	0,478	0,200	0,231	0,224	0,484	0,477	0,476	0,481	0,479	0,475	0,465	0,468	0,482	0,481	0,482	0,480	0,481	0,487	0,487	0,487
fn	12	10	11	3	16	18	11	29	20	17	19	19	15	14	13	19	20	19	23	19	5	5	3
tp	222	224	223	231	218	216	223	205	214	217	215	215	219	220	221	215	214	215	211	215	229	229	231
tn	181	174	180	123	183	183	181	117	119	126	124	120	116	120	123	122	120	122	119	121	116	118	116
fp	53	60	54	111	51	51	53	117	115	108	110	114	118	114	111	112	114	112	115	113	118	116	118
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,861	0,850	0,861	0,756	0,857	0,853	0,863	0,688	0,712	0,733	0,724	0,716	0,716	0,726	0,735	0,720	0,714	0,720	0,705	0,718	0,737	0,741	0,741
SENSIBILIDAD	0,949	0,957	0,953	0,987	0,932	0,923	0,953	0,876	0,915	0,927	0,919	0,919	0,936	0,940	0,944	0,919	0,915	0,919	0,902	0,919	0,979	0,979	0,987
ESPECIFICIDAD	0,226	0,256	0,231	0,474	0,218	0,218	0,226	0,500	0,491	0,462	0,470	0,487	0,504	0,487	0,474	0,479	0,487	0,479	0,491	0,483	0,504	0,496	0,504
GILBERT SCORE	0,774	0,762	0,774	0,670	0,765	0,758	0,777	0,584	0,613	0,635	0,625	0,618	0,622	0,632	0,641	0,621	0,615	0,621	0,605	0,620	0,651	0,654	0,656
PEIRCE SKILL SCORE	-0,143	-0,156	-0,140	-0,141	-0,155	-0,162	-0,136	-0,466	-0,441	-0,403	-0,417	-0,435	-0,438	-0,416	-0,397	-0,426	-0,437	-0,426	-0,448	-0,430	-0,304	-0,296	-0,171
HEIDKE SKILL SCORE	0,722	0,701	0,722	0,513	0,714	0,705	0,726	0,376	0,423	0,466	0,449	0,432	0,432	0,453	0,470	0,440	0,427	0,440	0,410	0,436	0,474	0,483	0,483
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,969	0,970	0,971	0,977	0,960	0,955	0,972	0,752	0,834	0,874	0,855	0,845	0,870	0,886	0,899	0,850	0,837	0,850	0,809	0,848	0,957	0,958	0,974

Tabla 69. Parámetros de rendimiento para los diferentes modelos evaluados en la ciudad de Manizales

	ANmean	AN01	AN02	AN03	AN04	AN05	AN06	AN07	AN08	AN09	AN10	RF01	RF02	IV01	IV02	G050	G075	G090	G095	G099	DIS1	DIS2	DIS3
fp	24	24	23	22	31	57	33	66	20	50	52	134	135	121	135	306	279	165	81	44	12	12	12
tp	303	303	304	305	296	270	294	261	307	277	275	193	192	206	192	21	48	162	246	283	315	315	315
tn	189	183	182	167	186	236	183	239	164	214	216	251	250	241	246	323	316	269	215	111	24	31	39
fn	138	144	145	160	141	91	144	88	163	113	111	76	77	86	81	4	11	58	112	216	303	296	288
AUC_D	0,76	0,77	0,81	0,79	0,75	0,70	0,72	0,65	0,79	0,70	0,72	0,57	0,57	0,60	0,57	0,12	0,27	0,50	0,62	0,71	0,76	0,81	0,81
AUC_E	0,42	0,43	0,42	0,47	0,42	0,32	0,45	0,29	0,47	0,37	0,36	0,36	0,36	0,37	0,36	0,03	0,10	0,28	0,43	0,58	0,73	0,76	0,74
EFICIENCIA/PRECISIÓN	0,927	0,927	0,930	0,933	0,905	0,826	0,899	0,798	0,939	0,847	0,841	0,590	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587
SENSIBILIDAD	0,927	0,927	0,930	0,933	0,905	0,826	0,899	0,798	0,939	0,847	0,841	0,590	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587	0,630	0,587
ESPECIFICIDAD	0,422	0,440	0,443	0,489	0,431	0,278	0,440	0,269	0,498	0,346	0,339	0,232	0,235	0,263	0,248	0,012	0,034	0,177	0,343	0,661	0,927	0,905	0,881
GILBERT SCORE	0,652	0,643	0,644	0,626	0,632	0,646	0,624	0,629	0,627	0,630	0,628	0,479	0,475	0,499	0,471	0,063	0,142	0,421	0,560	0,521	0,500	0,506	0,512
PEIRCE SKILL SCORE	-0,380	-0,399	-0,400	-0,444	-0,399	-0,261	-0,410	-0,254	-0,448	-0,326	-0,320	-0,225	-0,228	-0,255	-0,240	-0,009	-0,030	-0,171	-0,330	-0,638	-0,843	-0,822	-0,797
HEIDKE SKILL SCORE	0,505	0,486	0,486	0,443	0,474	0,547	0,459	0,529	0,440	0,502	0,502	0,358	0,352	0,367	0,339	0,052	0,113	0,318	0,410	0,205	0,037	0,058	0,083
ODDS RATIO SKILL SCORE	0,891	0,883	0,886	0,871	0,853	0,849	0,838	0,830	0,878	0,826	0,823	0,653	0,644	0,653	0,624	0,694	0,663	0,640	0,707	0,535	0,350	0,467	0,561

Los gráficos correspondientes a estos parámetros se presentan en la Figura 146 y Figura 147 respectivamente. En el eje vertical derecho se dibujan los valores Peirce Skill Score, por ser éstos negativos.

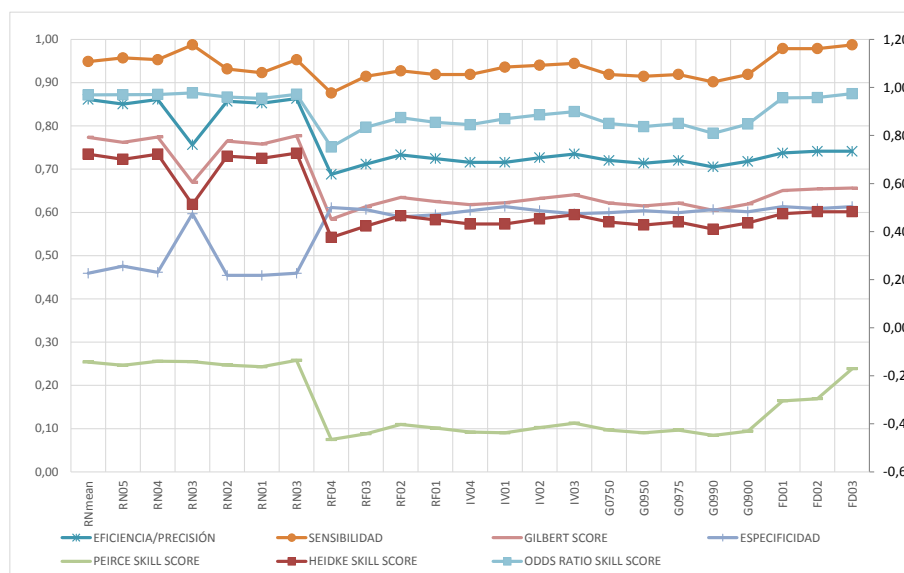


Figura 146. Parámetros de rendimiento de los modelos evaluados en la Cuenca del río Chinchiná

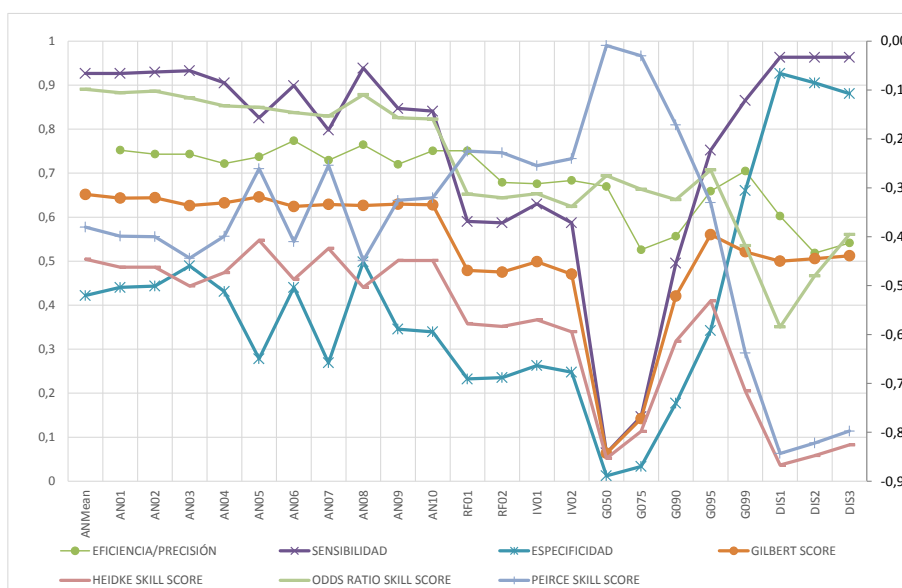


Figura 147. Parámetros de rendimiento de los modelos evaluados en la ciudad de Manizales

Los parámetros anteriores ofrecen un estimativo del ajuste de cada modelo, pero no así una descripción detallada de la clasificación de susceptibilidad (Chung and Fabbri 1999, Remondo et al. 2003, Chung and Fabbri 2008, Fabbri et al. 2003). Para analizar los niveles de clasificación, es conveniente comparar el área total de deslizamientos en cada clase con el porcentaje de área de esa clase de susceptibilidad.

4.10.3. Análisis de ajuste de los modelos

4.10.3.1. Área de estudio 1. Cuenca del río Chinchiná

4.10.3.1.1. Clasificación zonas inestables

En la Figura 148 se presentan las curvas de clasificación de zonas inestables para los diferentes modelos utilizados en la cuenca del río Chinchiná. En el eje vertical se dibujan los valores de susceptibilidad obtenidos para los puntos del inventario con deslizamientos. La Tabla 70 presenta los valores de área bajo la curva de clasificación obtenidos con los diferentes modelos, tanto para clasificación de zonas inestables (AUC_D), como estables (AUC_E). Resulta evidente que los modelos basados en la función discriminante, en términos generales, exhiben mejores resultados de clasificación ($FD3=0.883$); no obstante, las redes neuronales probadas, en su conjunto, ofrecen un valor medio de 0.843. Una conclusión derivada de la evaluación de la Tabla es que el orden en cuanto a eficiencia en clasificación de los modelos es: función discriminante, redes neuronales, números difusos y relación de frecuencias.

Tabla 70. . Valores de Área Bajo la Curva de clasificación de los diferentes modelos

	AUC_D	AUC_E
RN05	0,890	0,236
FD03	0,883	0,487
FD01	0,882	0,487
FD02	0,881	0,487
RN04	0,879	0,219
RN03	0,852	0,224
RN01	0,846	0,231
RNmean	0,843	0,221
G0750	0,841	0,482
G0975	0,841	0,482
G0900	0,840	0,481
G0950	0,839	0,481
RN02	0,837	0,200
G0990	0,831	0,480
RF01	0,826	0,481
RF02	0,818	0,476
RF03	0,805	0,477
RF04	0,714	0,484

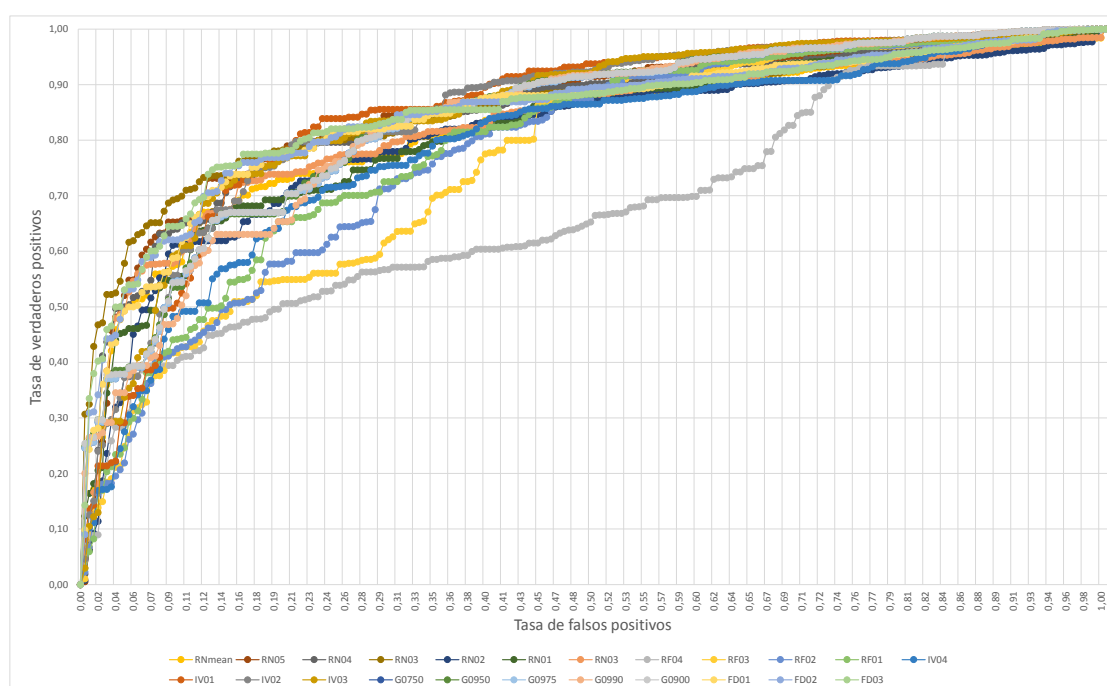
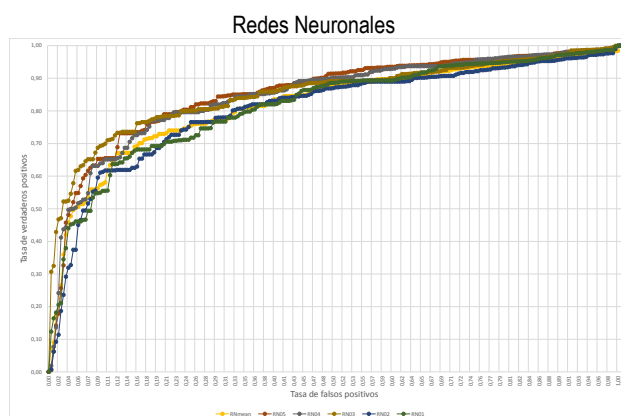
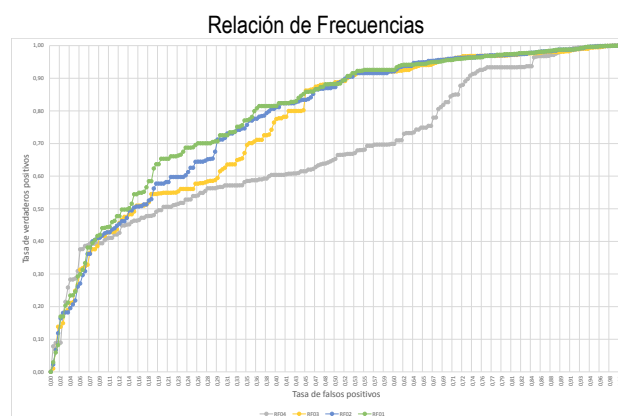


Figura 148. Curva ROC para clasificación de zonas inestables, área de estudio 1



Conjuntos Difusos



Función Discriminante

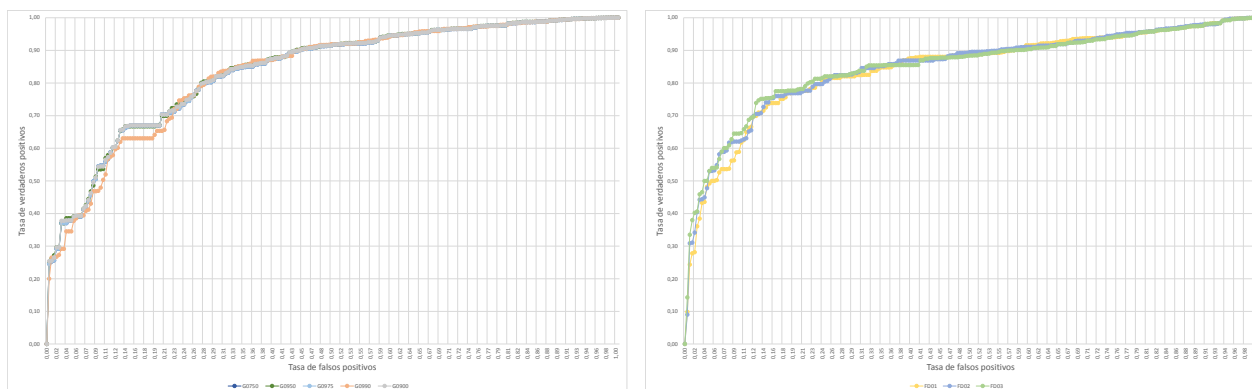


Figura 149. Curva ROC para clasificación de zonas inestables por cada método, área de estudio 1

4.10.3.1.2. Clasificación zonas estables

En la Figura 150 se presentan las curvas ROC correspondientes a la clasificación de zonas estables para todos los modelos probados en el área de estudio 1. Se destaca el hecho de que los modelos calculados mediante Redes Neuronales exhiben mejor comportamiento que las otras metodologías. A partir de la Tabla 70 se observa que el modelo medio presenta un valor de $AUC_E=0.221$, cercano al valor deseado de cero, mientras los otros métodos llegan a valores cercanos a 0.50.

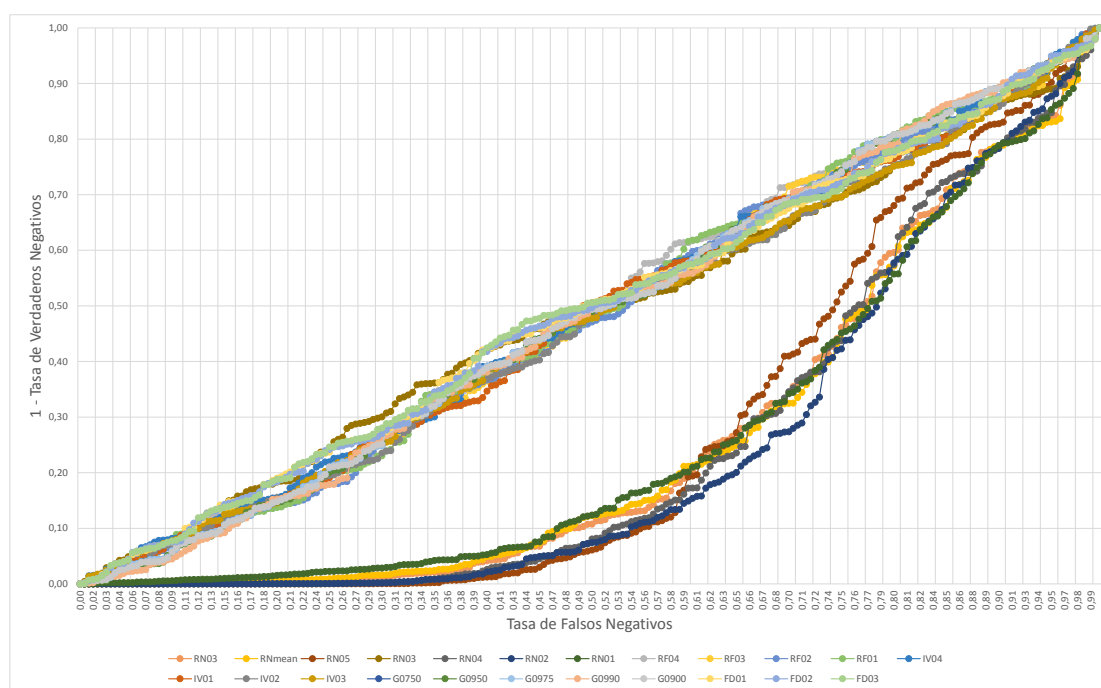


Figura 150. Curva ROC para clasificación de zonas estables, área de estudio 1

La Figura 151 presenta las curvas ROC por cada uno de los métodos utilizados. De la inspección de estos gráficos se puede observar el mejor desempeño para clasificación de celdas estables obtenido mediante el método de Redes Neuronales.

Redes Neuronales

Relación de Frecuencias

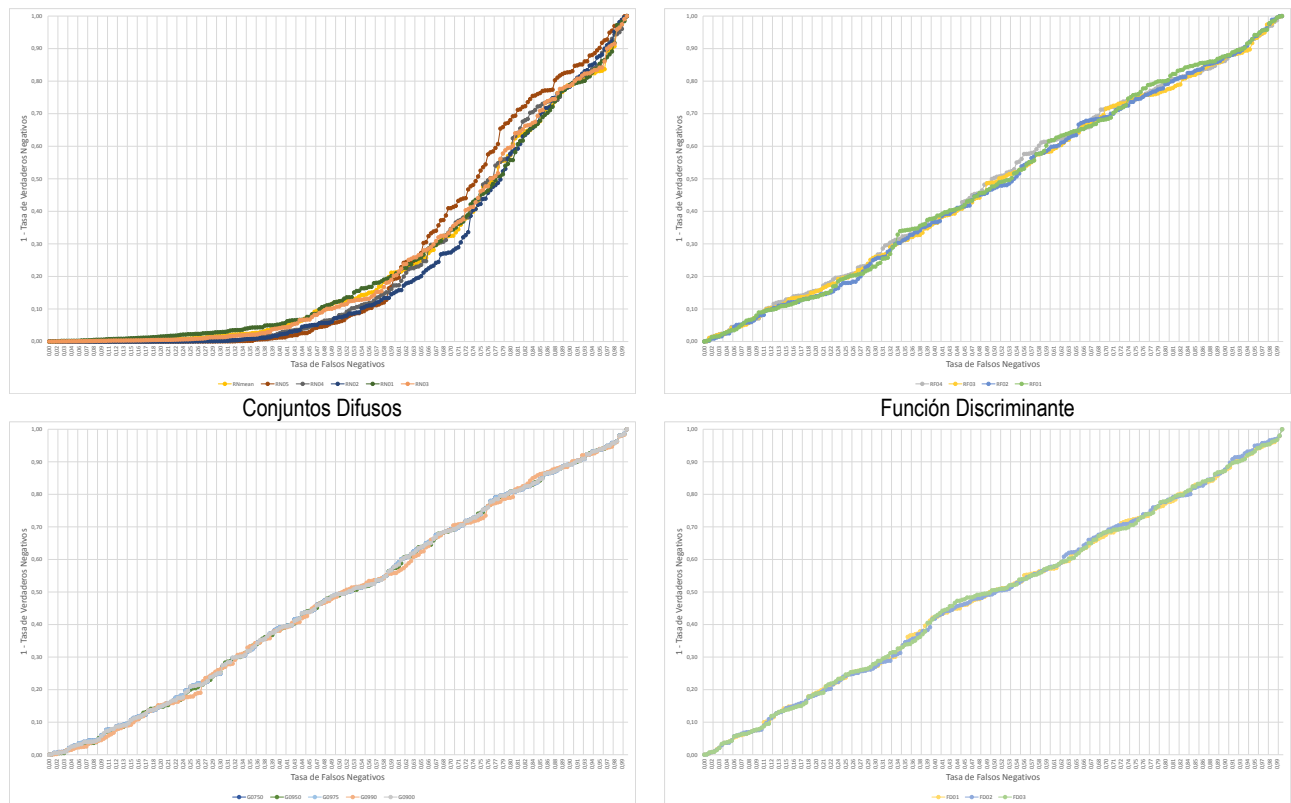


Figura 151. Curva ROC para clasificación de zonas estables, por cada método, área de estudio 1

La Figura 152 presenta las curvas ROC combinadas para cada método utilizado en los análisis.

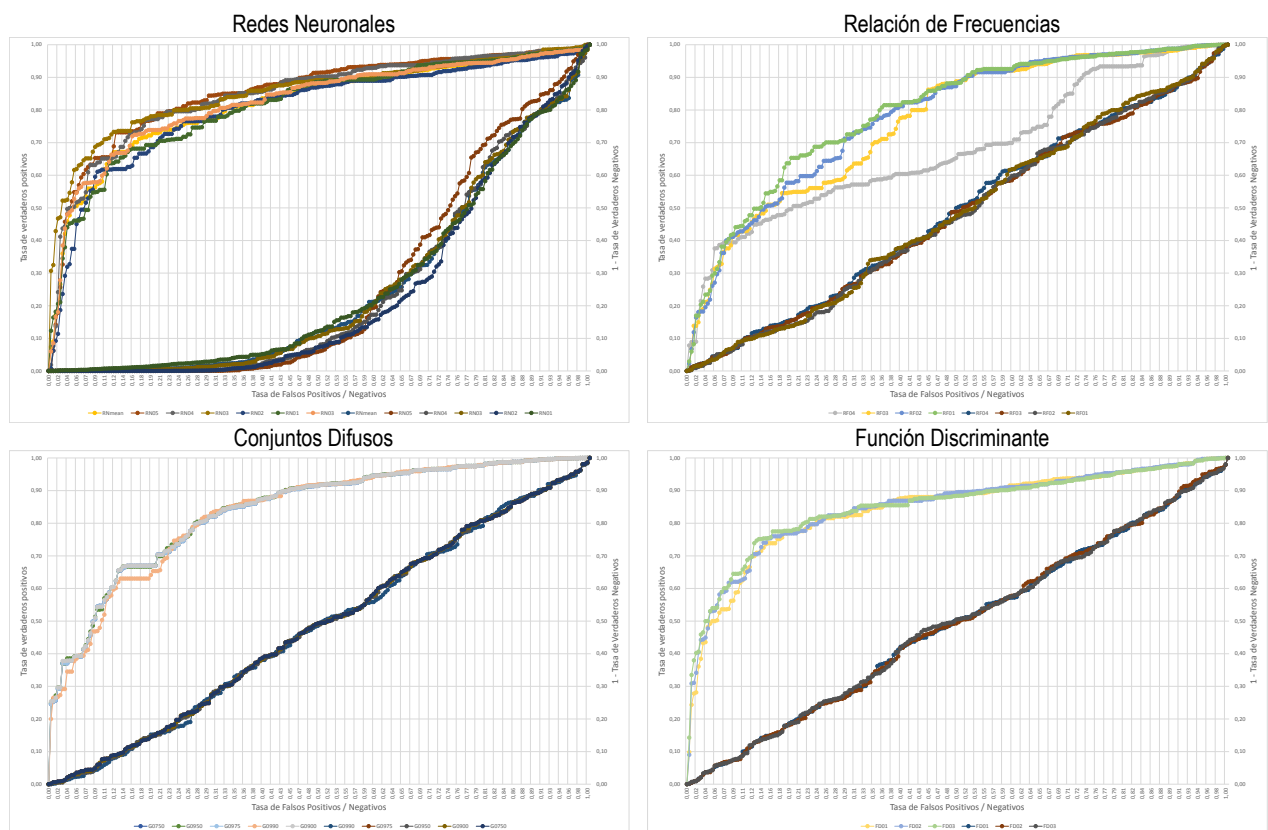


Figura 152. Curva ROC para clasificación de zonas inestables y estables, por cada método, área de estudio 1

4.10.3.2. Área de estudio 2. Área Urbana de Manzales

4.10.3.2.1. Clasificación zonas inestables

La Figura 154 presenta las curvas ROC para clasificación de zonas inestables por cada uno de los métodos utilizados. De la inspección de estos gráficos se puede observar el mejor desempeño obtenido mediante el método de Redes Neuronales y la función discriminante.

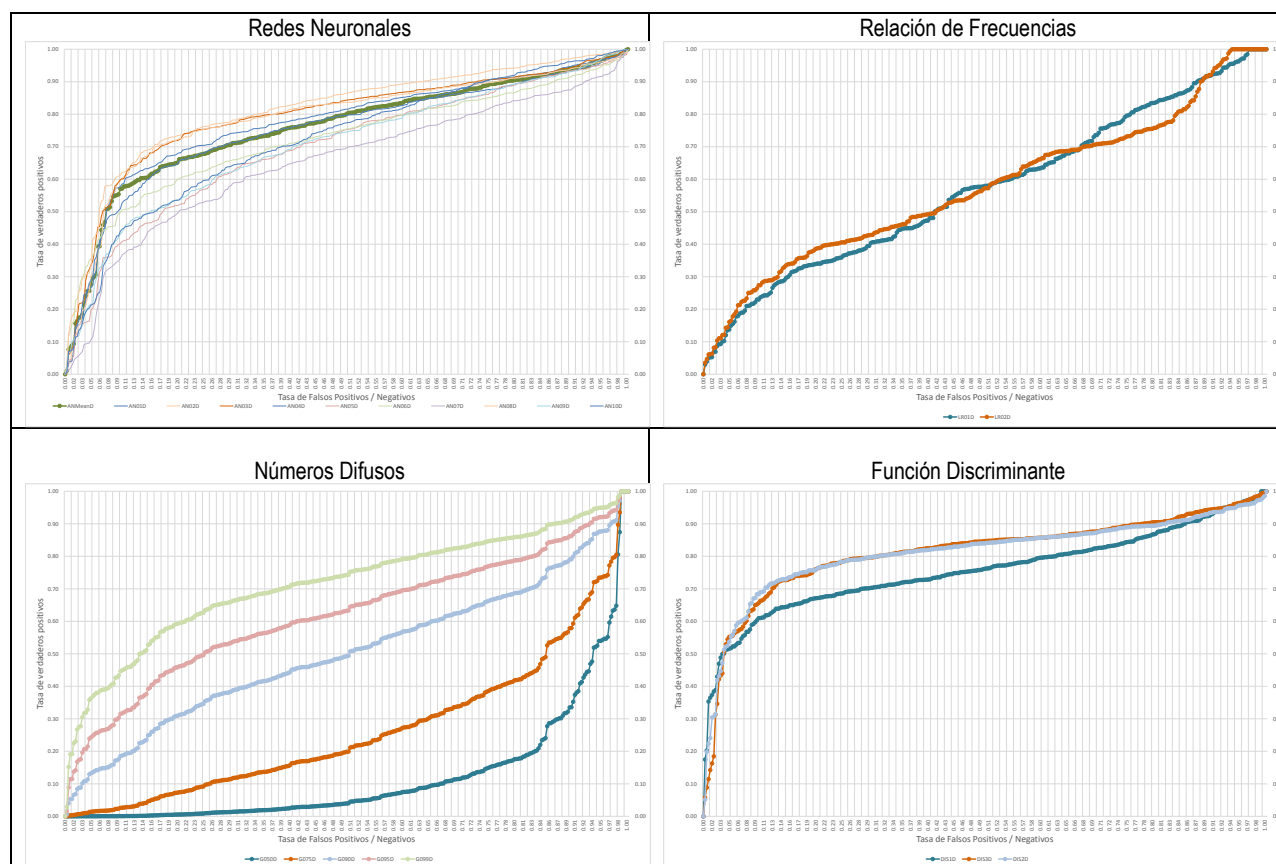


Figura 153. Curva ROC para clasificación de zonas inestables por cada método, área de estudio 2

4.10.3.2.2. Clasificación zonas estables

La Figura 154 presenta las curvas ROC para clasificación de zonas estables por cada uno de los métodos utilizados. De la inspección de estos gráficos se puede observar el mejor desempeño para clasificación de celdas estables obtenido mediante el método de Redes Neuronales. En el caso de Números Difusos, dependiendo de los valores del parámetro gamma utilizado al generar el modelo, puede tener un muy buen ajuste (Gamma 0.99), o ir decayendo a medida que se reduce su valor.

Redes Neuronales

Relación de Frecuencias

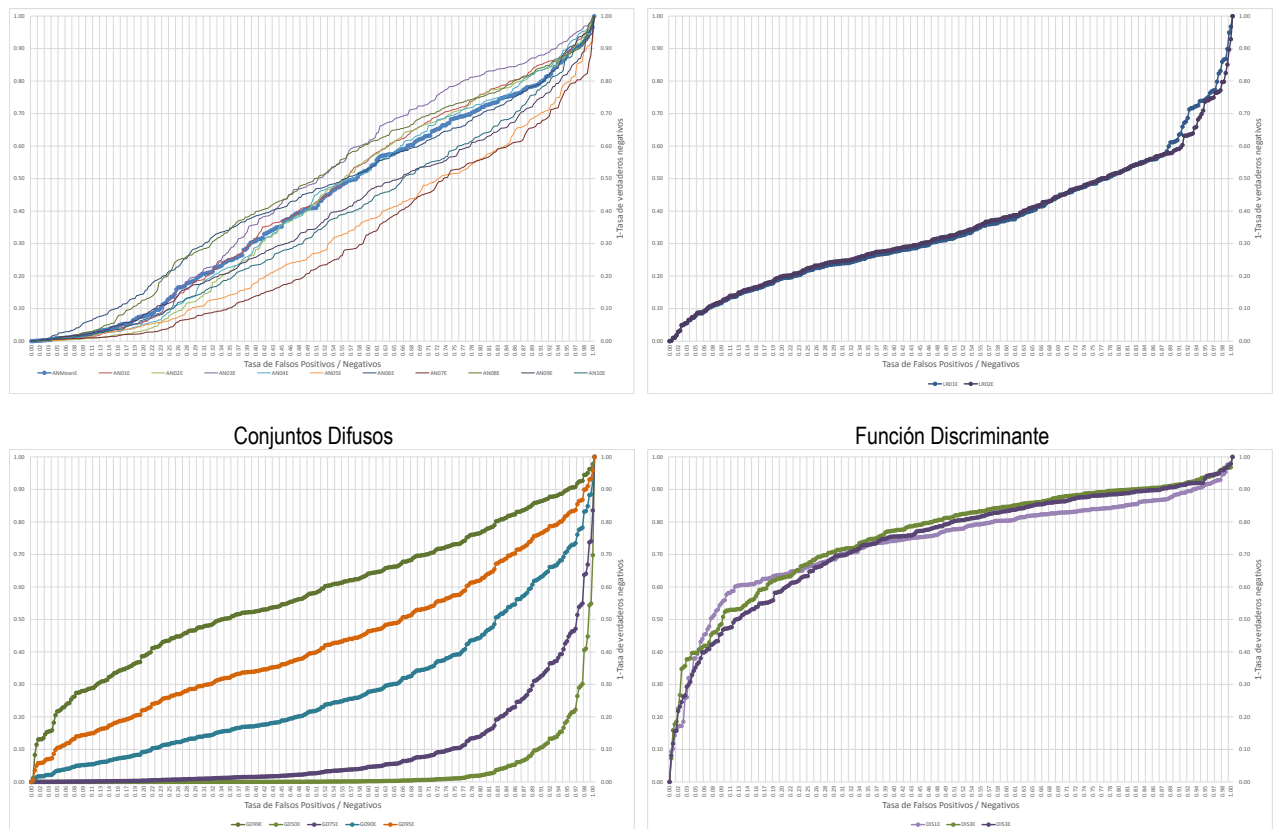
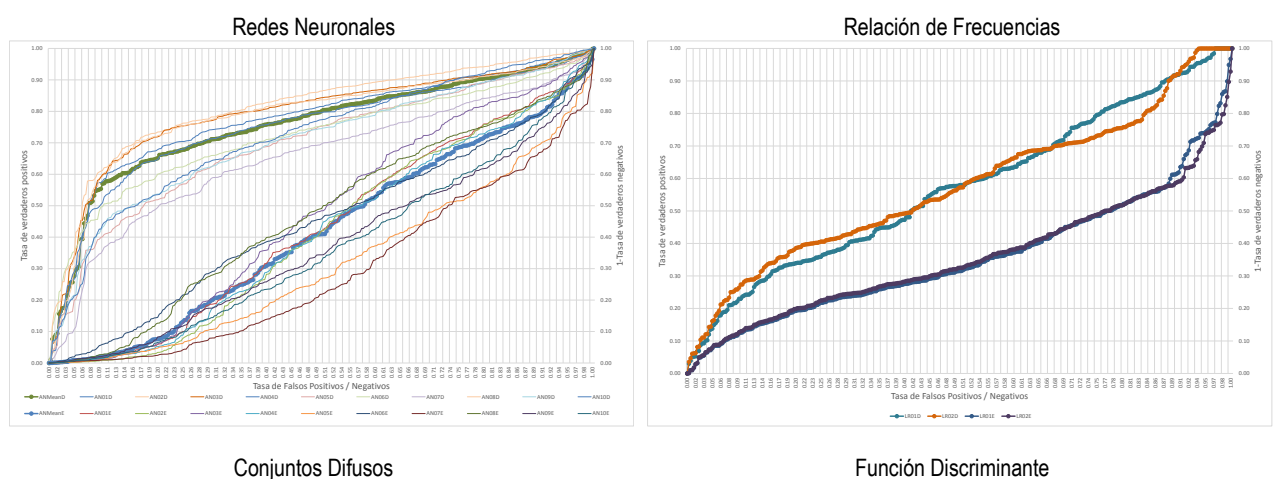


Figura 154. Curva ROC para clasificación de zonas estables, por cada método, área de estudio 2

La Figura 156 presenta las curvas ROC combinadas para cada uno de los métodos utilizados en los análisis. En conjunto, los mejores resultados se obtienen mediante el método de Redes Neuronales, seguido por los Números Difusos con un valor del parámetro Gamma de 0.99.



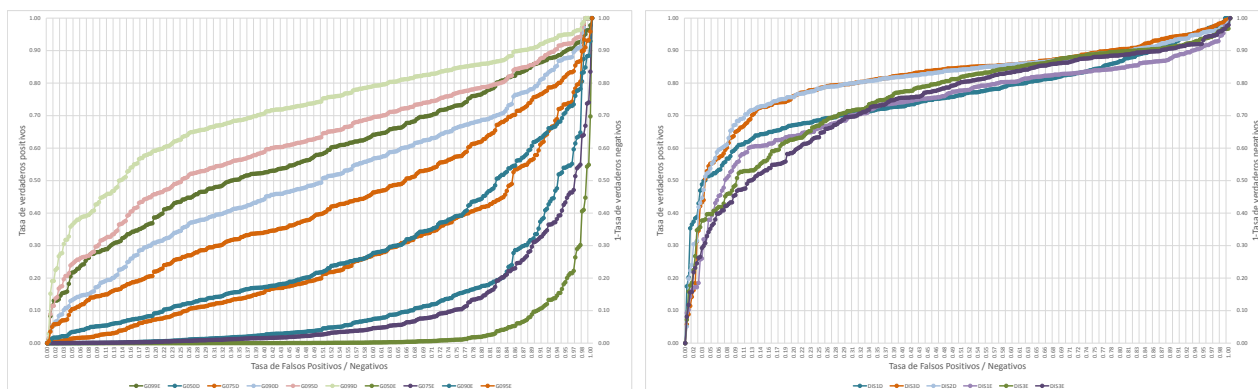


Figura 156. Curva ROC para clasificación de zonas inestables y estables, por cada método, área de estudio 2

4.10.4. Influencia individual de los factores de propensividad en los modelos

Teniendo en cuenta los modelos de redes neuronales obtenidos para las dos áreas de estudio consideradas en este trabajo, se ha realizado un análisis de sensibilidad general del modelo. El procedimiento consiste en ir variando los datos de entrada al modelo para cada uno de los factores de propensividad, con el objetivo de identificar cuáles son los factores que más inciden en la respuesta del modelo. Los resultados se presentan en la Figura 157 y Figura 158.

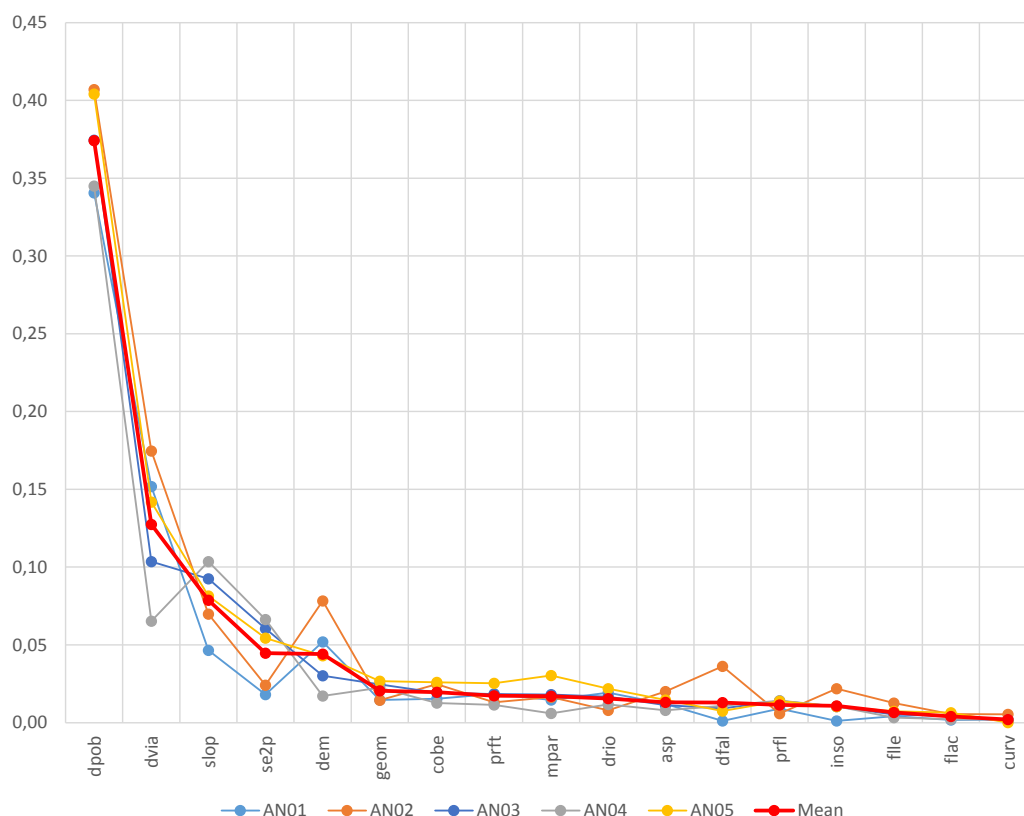


Figura 157. Análisis De Sensibilidad Modelo Redes Neuronales Área De Estudio 1

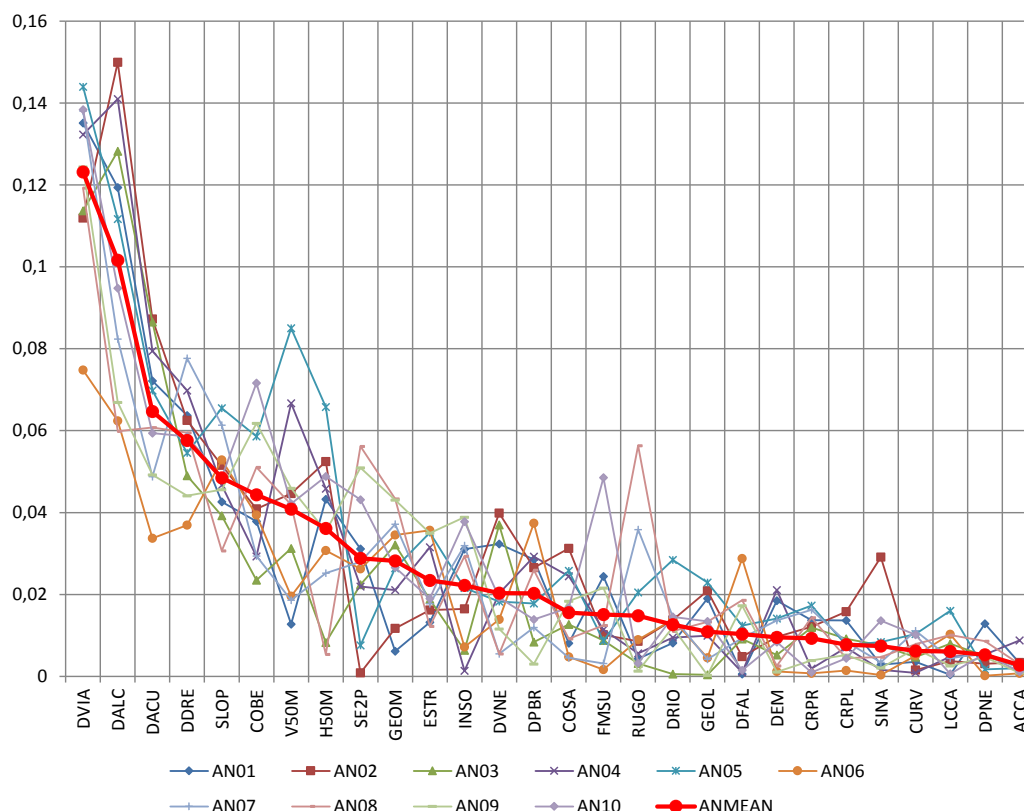


Figura 158. Análisis De Sensibilidad Modelo De Redes Neuronales Área De Estudio 2.

Una inspección de los gráficos mencionados permite comprobar que en ambos casos, los factores de propensividad asociados a la influencia antrópica, tienen relevancia en la salida del modelo. En el caso de la cuenca del río Chinchiná, la cercanía a zonas urbanas y la distancia a vías tienen mayor incidencia. Para la ciudad de Manizales, la distancia a vías y redes de acueducto, alcantarillado y cauces son los factores más relevantes. Otras variables “clásicas” dentro de los análisis de susceptibilidad por deslizamientos se sitúan en los siguientes niveles de importancia, como las pendientes.

Este mismo comportamiento se presenta con los modelos elaborados mediante Análisis Discriminante. La Tabla 21, en el caso de la Cuenca del río Chinchiná, presenta la importancia de la variable de distancia a zonas urbanas, y la Tabla 49, la importancia de la distancia a vías y a la red de alcantarillado, en el caso de la ciudad de Manizales.

Este resultado corrobora la importancia que tiene la influencia antrópica en la problemática estudiada, y la pertinencia de incluir factores de contexto en los análisis.

CONCLUSIONES

Existen algunos tipos de eventos naturales que son invisibles en términos de cifras absolutas y, para fines de mercados de seguros y reaseguros no son importantes por su bajo impacto desde el punto de vista económico; pero tales desastres perpetúan la pobreza de los más pobres. Ante esta realidad, existen diferentes enfoques que han querido abordar la problemática; tal es el caso de las teorías de construcción del desastre de las ciencias naturales, o el enfoque holístico que entiende los desastres como un problema no resuelto del desarrollo. En las páginas anteriores se ha expuesto una visión del caso desde una perspectiva amplia, con tendencia integradora, otorgando énfasis a la utilización de metodologías robustas que permitan la toma de decisiones con argumentos técnicos sólidos, pero incorporando además factores de contexto.

En la presente tesis se llevó a cabo una revisión del estado del arte en cuanto a metodologías de modelización de la susceptibilidad y amenaza por deslizamiento, teniendo presente que se requiere una valoración o dimensionamiento como paso inicial para fines de gestión. Aunque en la literatura abundan enfoques cualitativos para valoración (Sección 1.4), se prefiere el uso de análisis cuantitativos, pues permite eliminar la subjetividad de los estudios, y hacen posible la comparación directa del nivel de susceptibilidad y amenaza entre áreas.

Se ha expuesto el problema desde la perspectiva del riesgo de desastres, y se han empleado cuatro métodos cuantitativos con el objetivo de combinar información disponible o accesible, en entornos urbanos, para obtener clases de susceptibilidad y sus respectivos mapas asociados. Una diferencia importante con las metodologías disponibles en la literatura es la inclusión de factores de contexto, algunos de los cuales reflejan la influencia antrópica dentro del territorio, aspecto relevante cuando se aborda el tema del riesgo urbano dado su carácter dinámico de construcción social.

En estos métodos la escala de trabajo es importante; los lineamientos presentados se sitúan en una escala regional, que puede abarcar desde lo urbano, pasando por cuencas hidrográficas, hasta unidades territoriales más amplias, de tipo departamental o provincial. Resulta pertinente destacar que a estos niveles de escala, los estudios pretenden interrelacionar variables para obtener zonificaciones y en ningún caso construir modelos que obedezcan a principios físicos, los cuales requieren otro enfoque. En este sentido, la inclusión del agua como factor detonante del proceso de movimiento en masa se hace en términos de precipitación; es decir, antes de ser incorporado al sistema suelo, lo cual facilita la realización de análisis de tipo probabilista.

La metodología presentada y el potencial de uso de SIG y los métodos de cálculo cuantitativos de zonificación comentados, proveen una importante herramienta para futuros estudios de susceptibilidad, amenaza y riesgo frente a deslizamientos en ciudades localizadas en áreas

montañosas, y en particular, para la zona andina colombiana. Este documento constituye un primer intento por establecer lineamientos teóricos suficientes para la iniciación de un programa de zonificación de susceptibilidad de mayor alcance, actividad esencial dentro de los procesos de planificación del territorio de este tipo de unidades territoriales.

En general, los cuatro métodos han mostrado resultados consistentes, como puede verse en el apartado de discusión de resultados. No obstante, entre ellos, destaca el uso de Redes Neuronales Artificiales, tanto por su grado de acierto en la clasificación de zonas de terreno inestables, como por la distribución de los diferentes valores en clases de susceptibilidad.

En cuanto al grado de influencia individual de cada variable, la sección 4.10.4 de esta tesis, destaca la importancia de factores de contexto, como la cercanía a poblaciones y vías. Estas variables son las que mayor influencia ejercen en los modelos, pese a que se trata de factores que en los estudios tradicionales de zonificación de susceptibilidad y amenaza frente a deslizamientos pocas veces se consideran y constituyen un importante input dado el contexto poblado del área de estudio.

Si bien, se ha desarrollado una aplicación específica a una cuenca hidrográfica y una ciudad en particular, las metodologías descritas son flexibles y permiten ser aplicadas a cualquier entorno urbano con áreas montañosas. Incluso, las variables de entrada sugeridas en este documento pueden modificarse según la disponibilidad de datos y las características de las áreas donde desee aplicarse, sin influir notablemente en los procedimientos necesarios para generar los modelos de susceptibilidad. Por otro lado, en términos generales, un razonamiento metodológico como el aquí expuesto, puede adaptarse a otros tipos de fenómenos o problemas ambientales con estructuras similares: pares de factores causales y consecuencias medibles y georreferenciables, donde múltiples causas producen una consecuencia. Lo que varía en función del fenómeno sería la información de entrada representada en sus factores y métodos de cálculo.

Las variables temáticas elaboradas aquí provienen de información de la Alcaldía de Manizales. Es de esperarse que esta información varíe con el paso del tiempo, por lo cual, existe la necesidad de actualizar en períodos regulares las bases de datos de variables temáticas y el inventario de deslizamientos. Una evaluación de la susceptibilidad con los métodos aquí expresados elaborada sobre la base de un inventario de deslizamientos más amplio y detallado, esto es, un inventario multitemporal que permita establecer diferentes muestras asociadas a años de ocurrencia de deslizamientos, conduciría a un mayor ajuste de los modelos.

Para que los estudios sobre amenazas y riesgos de desastre sean realmente útiles, se requiere contestar a una pregunta formulada con claridad sobre la razón de ser de los estudios; se trata de preguntarse acertadamente para qué se necesitan los análisis desde el punto de vista de la planificación. Pensando en esto, se han propuesto mecanismos para llevar un análisis netamente

técnico de zonificación de amenaza o riesgo, a la esfera de la toma de decisiones. Utilizar la información generada desde el punto de vista técnico para la toma de decisiones públicas constituye un punto de contacto necesario que articula las diferentes disciplinas que necesariamente deben entrar en diálogo en los procesos de planificación del territorio.

Para la ordenación del territorio hay cierto tipo de amenazas determinantes, que definen las condiciones de uso de determinadas zonas. Una de estas amenazas la constituyen los movimientos en masa. Reconociendo esta situación, deben definirse metodologías concretas de análisis, como la que se presentó en las páginas anteriores, que adicionalmente consideren el contexto de aplicación de las mismas, y lo más importante, sugieran cómo utilizar las evaluaciones desarrolladas para la gestión municipal.

Es claro que a los factores detonantes debe otorgárseles la importancia que merecen. En lo posible, la pluviometría debe ser analizada estadísticamente para definir límites o umbrales críticos por encima de los cuales comienzan a presentarse los deslizamientos; y para definir la frecuencia en que estos umbrales son alcanzados y excedidos. Para ello se requiere información pluviométrica suficiente en calidad y cantidad.

Los agentes detonantes de deslizamientos como los terremotos y las lluvias intensas o prolongadas, constituyen eventos temporales, y son considerados en el contexto de este trabajo como “factores externos” en términos de susceptibilidad del terreno. El estudio adecuado de estos factores externos constituye un importante componente, separado, el “factor detonante”, que sumado a un eficiente sistema de zonificación de susceptibilidad, configuraría un futuro sistema de alerta temprana para la amenaza de deslizamientos en zonas urbanas, e indicará el momento en el cual es probable que se presenten los eventos, es decir, la probabilidad temporal de los eventos.

Por último, la posibilidad de obtener análisis cuantitativos en términos de probabilidad de ocurrencia, permite la aplicación de métricas de gestión de riesgo para cálculo de pérdidas y dimensionamiento de la gestión de riesgos necesaria. El ajuste de estas técnicas llevaría a una adecuada valoración de las consecuencias esperadas por la ocurrencia de deslizamientos, y su anticipación, mediante inversiones adecuadas. En último término, estas actuaciones redundarían en la protección de vidas de ciudadanos, ya sea en el momento de su aplicación, o diferidas en el tiempo, lo que constituye una de las metas del marco referencial de la sostenibilidad.

E ha abordado el problema de la escala de análisis de cara a la utilización de modelos de amenaza y riesgo para planificación territorial

LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

El conjunto de mapas presentado aquí como resultado de la evaluación de susceptibilidad constituye solo un primer paso por establecer un método de estudio a partir de la información disponible. Es evidente que con una depuración de los inventarios de deslizamientos y demás variables, puede actualizarse periódicamente el conjunto de insumos, obteniendo mejores resultados.

El primer paso hacia una investigación eficiente cuya meta sea zonificar un territorio según su susceptibilidad a deslizamientos, para evaluar el grado de amenaza o riesgo, es tener un buen mecanismo de registro de los diferentes eventos que van sucediendo. Corpocaldas ha empezado a sistematizar, mediante georreferenciación en campo y preparación de mapas de inventario, todos los eventos de deslizamiento que se van presentando año tras año en la ciudad. De la información disponible, se observa que hay trabajo por hacer en cuanto a la evaluación de las diferentes características de cada movimiento en masa, como puede ser su longitud, ancho, área, volumen, todo ello posible mediante una tarea de complementación del inventario inicial mediante trabajo cartográfico sucesivo, apoyado en fotointerpretación. Es indispensable mantener una metodología de trabajo base para todas las actualizaciones del inventario a fin de que los datos tomados sean comparables.

Solo emprendiendo una tarea de este tipo se podrá contar en un futuro con un completo inventario multi-temporal de deslizamientos, y no solo una distribución espacial de los eventos como puntos. Información de calidad en este aspecto permitirá investigar a fondo los patrones de distribución espacial de deslizamientos. Los mapas de inventarios geomorfológicos tienen como finalidad (i) zonificar la susceptibilidad de la ciudad a deslizamientos, (ii) proveer datos suficientes para estudiar las relaciones entre propiedades litológicas y estructurales y los patrones y tipos de deslizamiento producidos, (iii) pueden utilizarse para determinar posibles impactos de deslizamientos en la infraestructura urbana.

Se hace necesario también evaluar la magnitud probable de los eventos y así obtener un evento máximo con un tiempo de retorno asociado, para lo cual es básico contar con un inventario detallado de deslizamientos con sus atributos de tamaño asociados. Un estudio de este tipo unido a los mapas de susceptibilidad y el factor detonante (lluvia crítica), ofrecería una aproximación a la amenaza por deslizamientos. Por otro lado, sería necesaria una evaluación completa del concepto de vulnerabilidad, asociado a la amenaza de deslizamientos, en cuyo caso los elementos expuestos, expresados en pérdidas probables de bienes e infraestructura, pueden servir de aproximación. Se abre de esta manera líneas de estudio asociadas a la evaluación de vulnerabilidad y magnitudes esperadas asociada al fenómeno de deslizamientos en contextos urbanos.

En la confección de las cartografías de susceptibilidad se pueden aplicar diversas metodologías y criterios con mayor o menor presencia de los modelos numéricos en la definición de los criterios con los que se va a evaluar los factores conocidos que condicionan las inestabilidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, J. 1995. Risk. London: UCL Press.
- Albala-Bertrand, J. M. 1993. Political Economy of Large Natural Disasters with Special Reference to Developing Countries. Oxford, Clarendon Press
- Alcantara-Ayala, I. 2002. "Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries." *Geomorphology* 47(2-4): 107-124.
- Aleotti, P. 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. Vol. 73. Amsterdam, Elsevier.
- Aleotti, P., and R. Chowdhury. 1999. Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58 (1): 21-44.
- Aleotti, P. 2004. "A warning system for rainfall-induced shallow failures." *Engineering Geology* 73(3-4): 247-265.
- Antoine, P. 1977 Réflexions sur la cartographie ZERMOS et bilan des expériences en cours. *Bulletin Bureau des Recherches Géologiques et Minières*, 3:2 9-20 (in French).
- Aprile-Gnisset, J. 1992. La ciudad colombiana. Siglo XXI y siglo XX. Bogotá: Biblioteca Banco Popular.
- Arias, A. 1970. A measure of earthquake intensity. In: Hansen RJ (ed) *Seismic design for nuclear power plants*. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, pp 438-483.
- Atkinson, P. M. 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central apennines, Italy. *Computers Geosciences* 24 (4): 373-85.
- Ayala FJ, Cubillo S., Álvarez, A., Domínguez MJ, Laín R, Ortiz, G. 2003 Large scale rockfall reach susceptibility maps in La Cabrera Sierra (Madrid) performed with GIS and dynamic analysis at 1:5,000. *Nat Hazards* 30:325-340
- Ayala-Carcedo, F.J. 2003. Una reflexión sobre los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera, su naturaleza, funciones, problemática y límites. En F.J. Ayala y J. Corominas (Eds). *Mapas de Susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamento y aplicaciones en España*. IGME. Madrid. Pp7-20
- Ayala-Carcedo, F.J.; J. Olcina Cantos, L. Laín Huerta y Á. González-Jiménez. 2006. *Riesgos Naturales y desarrollo sostenible. Impacto, predicción y mitigación*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 280p
- Ayalew, L., Yamagishi, H. and Ugawa, N. 2004 Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1:1 73-81.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. 2005: The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65:15-31.
- Ayalew, L. and Yamagishi, H. 2005 The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65:1-2 15-31
- Baeza, C. 1994. Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica ETSECCPB., Universidad Politécnica de Cataluña.
- Baeza, C., and J. Corominas. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (12): 1251-63.
- Baeza, C., and J. Corominas. 1996. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques, ed. K. Senneset.
- Baeza, Cristina, N. Lantada, and J. Moya. 2010. Influence of sample and terrain unit on landslide susceptibility assessment at the Pobla de Lillet, eastern Pyrenees, Spain. *Environmental Earth Sciences* 60 (1): 155-67.
- Basheer, I., and M. Hajmeer. 2000. Artificial neural networks: Fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods* 43 (1): 3-31.
- Baum RL, Savage WZ., Godt JW. 2002. TRIGRS—a FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis. US Geological Survey Open-File Report 02-0424. Available via <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/>
- Baum, R. 2010. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides* 7 (3): 259-72.
- Beck, U. 1986. Die Risikogesellschaft: Auf dem Weg in eine andere Moderne. Frankfurt am Main: Suhrkamp
- Beguería, S. 2006. "Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees." *Geomorphology* 74(1-4): 196-206.
- Benda, L. and Zhang, W. 1990 Accounting for the stochastic occurrences of landslides when predicting sediment yields. *Proceedings Fiji Symposium, IAHS-AISH Publication* 192, 115-127.
- Bernknopf, R. L., et al. 1988. "Probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation: Bernknopf, R L; Campbell, R H; Brookshire, D S; Shapiro, C D *Bull Assoc Engng Geol* 25, N1, Feb 1988, P39-56." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 25(5): 225.
- Binaghi, E., et al. 1998. "Slope instability zonation: A comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches." *Natural Hazards* 17(1): 77-97.
- Bischof, H.-J. 2008. Risk in the modern world. Berlin: Springer.
- Bishop, C.M., 1995. Neural Networks for pattern recognition. Oxford University Press.
- Bishop, C. M. 1996. Neural networks for pattern recognition. 1st ed. USA: Oxford University Press.
- Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I.; Wisner, B. 1996. Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres. LA RED / ITDG, Bogotá. Primera edición. En: http://www.desenredando.org/public/libros/1996/vesped/vesped-todo_sep-09-2002.pdf. British Geological Survey, 1995, Project Summary Report: Rapid Methods of Landslide Hazard Mapping. Technical Report WC/95/30, BGS. Keyworth, Nottingham.
- Blank, R. P., Cleveland, G. B. 1968. Natural slope stability as related to geology, San Clemente Area, Orange and San Diego Counties, California. California Division of Mines and Geology, Special report 98, pp 19.
- Bonham-Carter GF. 1994. Geographic information system for geoscientists: modelling with GIS. Pergamon, Oxford, p 398
- Borga, M., Dalla Fontana, G. and Cazorzi, F. 2002a. Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. *Journal of Hydrology*, 268: 56-71.

- Borga, M., Dalla Fontana, G., De Ros, D. and Marchi, L. 2002b. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrological Processes*, 17:2 505-508.
- Brabb, E., and E. H. Pampeyan. 1972. Preliminary map of landslide deposits in san mateo county, california. US Geological Survey, Miscellaneous Field Studies, Map MF-360, scale 1:62.500 (reprinted in 1978).
- Brabb, E. 1977. "Landslide Hazard In San-Francisco Bay Region." *Water, air, and soil pollution* 7(2): 237-238.
- Braudel, F. 1969: *Histoire et sciences sociales. La longue durée*. In: *Écrits sur l'histoire*. Flammarion, Paris. Brand y Hudson (1982),
- Brass, A., Wadge, G., Reading, A. J. (1989): *Designing a Geographic Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies*. In *Proc., Economic geology and geotechnics of active tectonic regions*, University College, University of London, April, pp 13.
- Bronfenbrenner, U. 1979. *The Ecology of Human Development: Experiments by Nature and Design*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Brooks, S. 2004. Towards establishing climatic thresholds for slope instability: Use of a physically-based combined soil hydrology-slope stability model. *Pure and Applied Geophysics* 161 (4): 881-905.
- Brunetti, M. T., et al. 2010. "Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(3): 447-458.
- Burton, I., Kates, R.W., White, G.F. 1968. *The Human Ecology of Extreme Geophysical Events*. Natural Hazard Research, Working Paper 1. Department of Geography, University of Toronto.
- Caine, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris-flows. *Geografiska Annaler*, 62 A: 23-27.
- Campbell, R.H. 1973. Isopleth map of landslide deposits, Point Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalizing and quantifying areal distribution of landslides. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-535, scale 1:24,000.
- Cannon, T. 1993. *Vulnerability Analysis and the Explanation of Natural Hazards*, en Varley, Ann, *Disasters Development and Environment*, Wiley, Chichester.
- Cannon, S. H., Ellen S. D. 1985. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay Region, California, Calif. *Geol.*, 38, pp 267-272.
- Canuti, P., Focardi, P., Garzonio, C. A. 1985: Correlation between rainfall and landslides. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 32, pp 49-54.
- CAPRA. 2002. Rainfall hazard module ERN-LluviaNH. Probabilistic Risk Assessment Program. <http://www.ecapra.org/ern-nhrain>
- Cardona, O.D. 1995. *Prevención de Desastres y Preparativos para Emergencias: Aspectos Técnico Científicos, Sociales, Culturales e Institucionales*, Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Cardona, O.D. 1999. *Environmental Management and Disaster Prevention: Two Related Topics*. A Holistic Risk Assessment and Management Approach. Natural Disaster Management, Ingleton, J. (Ed.) IDNDR, Tudor Rose, London, UK.
- Cardona, O. D. 2001. *Estimación Holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. En: http://www.tdcat.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0416102-075520/
- Cardona O. D.; Hurtado J. E.; Duque, G.; Moreno, A.; Chardon A. C.; Velásquez, L. S. y Prieto, S. D. 2003. *La Noción del Riesgo desde la Perspectiva de los Desastres: Marco Conceptual para su Gestión Integral*. BID/IDEA Programa de Información e Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalml.edu.co>
- Cardona, O.D., 2004. *The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management* in *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, G. Bankoff, G. Frerks, D. Hilhorst.(Ed), Earthscan Publishers, London, UK.
- Cardona, O.D., et al. 2014. *Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidroclimáticos en el ordenamiento territorial municipal*. Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital Bogotá - Cundinamarca: 188.
- Can, Tolga, Hakan A. Nefeslioglu, Candan Gokceoglu, Harun Sonmez, and Tamer Y. Duman. 2005. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology* 72 (1-4) (12): 250-71.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. 1995: GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara A, Guzzetti F (eds) *Geographical information system in assessing natural hazards*. Adv
- Carrara, A. and Merenda, L., 1976. Landslide inventory in northern Calabria southern Italy. *Geological Society of America Bulletin*, 87: 1153-1162.
- Carrara, A. 1978 *Considerazioni sulla cartografia applicata alla stabilità dei versanti*. Seminario Sottoprogetto Fenomeni Franosi, March 1978, Bari, 11 p. (in Italian).
- Carrara, A., Pugliese-Carratelli, E. and Merenda, L. 1977 Computer based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. *Zeischrift für Geomorphologie N.F.*, 21:2 187-222.
- Carrara, A. 1992 Landslide hazard assessment. *Proceeding 1st Simposio Internazionale Sensori Remoti y Sistema de Informativo Geografico para el Studio de Recursos Naturales*, 10-12 March, Bogotá, 329-355
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. and Reichenbach, P. 1991a. GIS Techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landform* 16:5 427-445
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. and Reichenbach, P. 1991b. *Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation*. *Proceedings ALPS 90 6th International Conference and Field Workshop on Landslides*, Milan, 12 September 1990, 17-28
- Carrara, A., Cardinali, M. and Guzzetti, F. 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk". *ITC Journal*, 2: 172-183
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175
- Carrara, A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical geology* 15 (3): 403-426.
- Carrara, A., et al. 2003. "Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard." *Earth Surface Processes and Landforms* 28(10): 1125-1142.
- Carrara, A., et al. 2008. "Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment." *Geomorphology* 94(3-4): 353-378
- Carrara, A., M. Cardinali, and F. Guzzetti. 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal* 2 : 172.

- Carrasco, R.M., Pedraza, J., Martín-Duque, J.F., Mattered, M., Sanz, M.A. and Bodoque, J.M. 2003. Hazard Zoning for Landslides Connected to Torrential Floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS Techniques. *Natural Hazards*, 30:3 361-381.
- Casadei M, Dietrich WE, Mille NL. 2003. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation on soil mantled landscapes. *Earth Surf Proc Land* 28(9):925-950
- Cascini L, Bonnard Ch, Corominas J, Jibson R, Montero-Olarte J. 2005. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development—state of the art report. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Landslide risk management*. A.A. Balkema, Amsterdam, pp 199-235
- Castellanos Abella, E. A. 2008. Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands. Enschede, The Netherlands, University of Utrecht. PhD: 273.
- Castellanos Abella, E. and C. Van Westen. 2008. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from san antonio del sur, quantanamo, cuba. Vol. 94. [Amsterdam]: Elsevier Science
- CEPAL, and PNUD. 1999. El terremoto de enero de 1999 en colombia: Impacto socioeconómico del desastre en la zona del eje cafetero.
- Castillo, J.C., Salazar, J. 2001. La planeación Urbanística en Colombia. En: *Trayectorias Urbanas en la Modernización del Estado en Colombia*. TM Editores. Medellín.
- Chacón, J., Irigaray, C. y Fernández, T. 1992. Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un sistema de información geográfica. III simp. Nac. Sobre taludes y laderas inestables. La Coruña. Vol.1:121-133.
- Chacón, J., C. Irigaray, T. Fernández, and R. El Hamdouni. 2006. Engineering geology maps: Landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65 (4): 341-411.
- Chardon, A. C. 2002. Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas urbanas expuestas a amenazas naturales. el ejemplo andino de manizales colombia.
- Chauhan, S., et al. 2010. "Landslide Susceptibility Zonation through ratings derived from Artificial Neural Network." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12(5): 340-350.
- Chivata Cardenas, I. 2008. "Assessing landslide susceptibility by applying fuzzy sets, possibility evidence-based theories." *Ingeniería E Investigacion* 28(1): 26-40.
- Chung, C. 2006. Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computers Geosciences* 32 (8): 1052-68.
- Chung, C. J. F., et al. 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. International Workshop on Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards SEP 20-22, 1993 PERUGIA, ITALY
- Chung CF, Fabbri AG 1993 Representation of geoscience data for information integration. *J Non-Renew Resour* 2(2):122-139
- Chung C.-J. F. and Fabbri, A.G. 1998. Three Bayesian prediction models for landslide hazard, In: Buccianti, A., Nardi, G. and Potenza, R. (eds.) *Proceedings of International Association for Mathematical Geology 1998 Annual Meeting (IAMG'98)*, Ischia, Italy, October 1998, 204-211.
- Chung, C., and A. Fabbri. 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65 (12): 1389-99.
- Chung, Chang-Jo F., and Andrea G. Fabbri. 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards* 30 (3): 451-72.
- Chung C.-J. F. and Fabbri, A.G. 2005. Spatial prediction of the occurrences of future landslides and their validations. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E. (eds.) *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, Cd-Rom, 10 p
- Chung, Chang-Jo, and Andrea G. Fabbri. 2008. Predicting landslides for risk analysis -- spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology* 94 (3-4): 438-52.
- Clerici, A., S. Perego, C. Tellini, and P. Vescovi. 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48 (4): 349-64.
- Coburn, A., Spence, R. 1992. *Earthquake Protection*, John Wiley & Sons, New York.
- Coe JA, Michael JA, Crovelli RA, Savage WA. 2000. Preliminary map showing landslides densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records. Open-file report 00-303. USGS, Seattle
- Coe, J. A., Kinner, D. A., and Godt, J. W. 2008. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado. *Geomorphology*, 96(3):270-297.
- Collin-Rouse, W. y Farhan Yahya, I. 1976. Threshold slopes in South Wales. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 9: 327-338
- Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy. 2004. Patternships for reducing landslide risk. assessment of the national landslide hazards mitigation strategy. Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies: 143.
- Connell, L. D., Jayatilaka, C. J., Nathan, R. 2001. Modeling flow and transport irrigation catchments, spatial application of subcatchment model. *Water Resour Res* 37(4):965-977.
- Corominas, J. 2003. Predicción temporal de los movimientos de ladera. En F.J. Ayala y J. Corominas (eds). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamento y aplicaciones en España*. IGME. Madrid. Pp. 37-54. Corominas et al. (2004)
- Corominas, J. and J. Moya. 2008. "A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes." *Engineering Geology* 102(3-4): 193-213.
- Corominas, J., et al. 2014. "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(2): 209-263.
- CORPOCALDAS. 1999. Plan de Ordenamiento Ambiental del Territorio de la Cuenca del río Chinchiná. Síntesis de Diagnóstico, Tomo I. Convenio Interinstitucional Corporación AutCorpocaldas - Aguas de Manizales. Febrero de 1999.
- CORPOCALDAS. "Base De Datos De Deslizamientos Ocurredos En El Año 2003." (Base de datos cartográfica, Manizales).
- Coupé, F., E. Arboleda, and C. Garcia. 2007. Villatina: Algunas reflexiones 20 años después de la tragedia. *Revista Gestión y Ambiente* 10 (2): 31.
- CRED. EM-DAT: The OFDA/CRED international disaster database. université catholique de louvain - Brussels - Belgium. 2010. [cited Nov/2010 2010]. Available from www.em-dat.net.
- Cross, M. 1998: Landslide susceptibility mapping using the matrix assessment approach: a Derbyshire case study. In Maund JG, Eddleston M (eds) *Geohazards in engineering geology*. The Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications 15, pp 247-261.

- Cross, M. 2002. Landslide susceptibility maps using the matrix assessment approach: a Derbyshire case study. In Griffiths JS (ed) Mapping in Engineering Geology. The Geological Society London, Key Issues in Earth Sciences 1:267–282.
- Crosta, G. 1998. Regionalization of rainfall thresholds: An aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology* 35 (2-3): 131-45.
- Crosta GB, Frattini P. 2003 Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 3(1–2):81–93 Crovelli, 2000
- CROZIER, M.J. 1986. Landslides: causes, consequences & environment. Croom Helm. London, England. 245pp. En TERLIEN: 1996
- Crozier, M. 1999. Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms* 24 (9): 825-33.
- Cruden, D. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43: 27-29.
- Cruden, D. and Fell, R., 1997. Landslide risk assessment. A.A. Balkema, Rotterdam, 371pp.
- Cuny, F. C. 1983: Disaster and Development. Oxford University press, USA.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., Paudyal, P. 2008. Predictive modeling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weight-of-evidence. *Geomorphology* 102, pp 496–510.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Masuda, T., and Yamanaka, M. 2006. Roadside slope failures in Nepal during torrential rainfall and their mitigation. Disaster mitigation of debris flow, slope failures and landslides, (Interpraevent 2007), Universal Academy Press, Tokyo, 2:503–514
- Dahal, R. K. and S. Hasegawa. 2008. "Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya." *Geomorphology* 100: 429-443.
- Dai, F.C. and Li, J. 2000. Application of geographical information systems in landslide studies. *Geological Science and Technology Information*, 19:1 91-96.
- Dai, F. C. and C. F. Lee. 2001. "Frequency–volume relation and prediction of rainfall-induced landslides." *Engineering Geology* 59(3–4): 253-266.
- Dai, F. C., and C. F. Lee. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau island, Hong Kong. *Geomorphology* 42 (3-4) (1/15): 213-28.
- Dai, F. C., C. F. Lee, and Y. Y. Ngai. 2002. Landslide risk assessment and management: An overview. *Engineering Geology* 64 (1) (APR): 65-87.
- DANE. 1994. Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. República de Colombia.
- Davies, W. E. 1974a: Landslide susceptibility map of part of the Bridgeville 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-274, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974b. Landslide susceptibility map of part of the Canonsburg 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-276, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974c. Landslide susceptibility map of part of the Donora 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-277, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974d. Landslide susceptibility map of part of the Freeport 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-278, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974e. Landslide susceptibility map of part of the McKeesport 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-280, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974f. Landslide susceptibility map of part of the Monongahela 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-281, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974g. Landslide susceptibility map of part of the New Kensington East 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-283, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974h. Landslide susceptibility map of part of the New Kensington West 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-284, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974i. Landslide susceptibility map of part of the Braddock 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-273, scale 1:24,000, pp 8.
- Davies, W. E. 1974j. Landslide susceptibility map of part of the Curtisville 7-1/2 minutes quadrangle. Allegheny County and vicinity, Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 74-276, scale 1:24,000, pp 8. Davis PA, Goodrich MT (1990) A proposed strategy for the validation of ground-water flow and solute transport models. Technical report. Sandia National Labs, Albuquerque
- Dean, M. 1999. Governmentality: Power and rule in modern society. London: Sage.
- DeGraff, J. V., Romesburg, H. C. 1980. Regional landslide- susceptibility assessment for wildland management: a matrix approach. In: Coates DR, Vitek JD (eds) Chap. 19, pp 401–414.
- Desinventar Project. La RED, 2004. <http://www.desinventar.org/desinventar.html> Red de estudios sociales en prevención de desastres naturales en América Latina
- Dhakal, A. S., Sidle, R. C. 2003. Long-term modeling of landslides for different forest management practices. *Earth Surf. Process. Landforms* 28, pp 853-868.
- Dhakal, A. S., Sidle, R. C. 2004a. Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions, *Hydrol. Process.*, 18, pp 757-776.
- Dhakal, A. S., Sidle, R. C. 2004b. Pore water pressure assessment in a forest watershed: simulations and distributed field measurements related to forest practices. *Water Resour. Res.*, 40, W02405, doi: 10.29/2003WR002017.
- Dias, E.C., Zuquette, L.V. 2004. Methodology adopted for probabilistic assessment of landslides in Ouro Preto, Brazil. In: Lacerda WA, Ehrlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) Landslides: evaluation and stabilization. Balkema, Taylor & Francis Group, London, pp 287–292.
- Dietrich WE, Reiss R, Hsu ML, Montgomery DR. 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrol Process* 9:383–400
- Dietrich, W. E., Montgomery, D. R. 1998. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Technical Report, February 1998, pp 29.
- DMTP Disaster Management Training Programme. 1997. Disasters and Development. UN Disaster Management Training Programme. Disaster Management Center. University of Wisconsin.

- DNP. Ciudades colombianas: Caracterización, oportunidades y desafíos. 2010. [cited Nov/2010 2010].
- Dodagoudar, G. R., and G. Venkatachalam. 2000. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory. *Computers and Geotechnics* 27 (2) (9): 101-15.
- Donati, L., and M. C. Turrini. 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: Application to an area of the apennines (valnerina; perugia, italy). *Engineering Geology* 63 (3-4) (3): 277-89.
- Douglas, M. 1966. Purity and danger: An analysis of the concepts of pollution and taboo. London: Routledge and Kegan Paul
- Douglas, M., A. Wildavsky. 1982. Risk and culture. Berkeley, CA: University of California Press.
- Dubois, D. 2004. Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities. *Reliable Computing* 10 (4): 273-97.
- Einstein, H. 1988. Special lecture - landslide risk assessment procedure. ROTTERDAM: A A BALKEMA.
- Einstein, H. H. 1997. Landslide risk - systematic approaches to assessment and management, eds. DM Cruden, R. Fell.
- EIRD.2001. Repaso de las tendencias en la reducción de los desastres en las américas..
- Ercanoglu, M. 2005. Landslide susceptibility assessment of SE bartin (west black sea region, turkey) by artificial neural networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (6): 979-92.
- Ercanoglu, M. 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of yenice, NW turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology* 41 (6): 720-30.
- EmDat CRED. 2012. The OFDA/CRED International Disaster Database <http://www.em-dat.net> . Center for Research on the Epidemiology of Disasters. Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium
- Ercanoglu, M. and C. Gokceoglu. 2004. "Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey)." *Engineering Geology* 75(3-4): 229-250.
- Ermini, Leonardo, Filippo Catani, and Nicola Casagli. 2005. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66 (1-4): 327-43.
- Esguerra, J. E. 1993. La reconstrucción de manizales en los años veinte. Implicaciones ideológicas, políticas y culturales. Maestría de Historia y Teoría de la Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia.
- ESRI. 1998. ArcView GIS. environmental systems research institute. Vol. v3.1.
- Fabbri, Andrea G., Chang-Jo F. Chung, Antonio Cendrero, and Juan Remondo. 2003. Is prediction of future landslides possible with a GIS? *Natural Hazards* 30 (3): 487-503.
- Fall, M., Azzam, R. 1998: Application de la géologie de l'ingénieur et de SIG à l'étude de la stabilité des versants côtiers, Dakar, Senegal. In: Moore D, Hungr O (eds) Proceedings of the 8th IAEG Congress, Vancouver. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 1011-1018.
- Fall, M., et al. 2006. "A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping." *Engineering Geology* 82(4): 241-263.
- Federación Colombiana de Municipios, 2013. La Federación Colombiana de Municipios. Su papel en la Cooperación al Desarrollo. V Encuentro de Cooperación Descentralizada. Cali, 27 de Junio de 2013.
- Fell, R. 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal* 31 (2) (APR): 261-72.
- Fell, R., J. Corominas, C. Bonnard, L. Cascini, E. Leroi, and W. Savage. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning commentary. *Engineering Geology* 102 (3-4): 99-111.
- Fell, Robin, Jordi Corominas, Christophe Bonnard, Leonardo Cascini, Eric Leroi, and William Z. Savage. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102 (3-4): 85-98.
- Fernández Merodo, J.A., Pastor, M., Mira, P., Tonni, L., Herreros, M.I., Gonzalez, E. and Tamagnini, R. 2004 Modelling of diffuse failure mechanisms of catastrophic landslides. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193:27-29 2911-2939.
- Finlay, P. 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* 34 (6): 811-24.
- Fischhoff, G., B. Goitein, Z. Shapiro. 1982. The experienced utility of expected utility approaches. In: Expectations and actions: Expectancy-value models in psychology. Edited by N. T. Feather. Hillsdale: Lawrence Erlbaum. 315-340.
- Fischhoff, B. 1995. Risk perception and communication unplugged: Twenty years of process. *Risk Analysis* 15/2:137-145
- Foucault, M. 1982. Structuralism and post-structuralism. *Telos* 55: 195 - 211.
- Fournier d'Albe, M. 1985. The quantification of seismic hazard for the purposes of risk assessment. International conference on reconstruction, restoration and urban planning of towns and regions in seismic prone areas. Skopje, Yugoslavia.
- Fratini, P., et al. 2004. "Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment." *Engineering Geology* 73(3-4): 277-295.
- Fujii, Y. 1969. Frequency distribution of landslides caused by heavy rainfall. *Journal Seismological Society Japan* 22 : 244-7.
- Garcia Acosta, V. (coord.) 2005: La construcción social de riesgos y el huracán Paulina. Ediciones de la Casa Chata, CIESAS, México.
- Garcia-Rodriguez, M. J., and J. A. Malpica. 2010. Assessment of earthquake-triggered landslide susceptibility in el salvador based on an artificial neural network model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (6): 1307-15.
- Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA), 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Publicación geológica multinacional No.4 2007. ISSN 0717-3733.
- Gilbert GF. 1884. Finley's tornado predictions. *Am Meteorol J.* 1:166-172
- Gitirana Jr G, Santos M, Fredlund M. 2008. Three-dimensional slope stability model using finite element stress analysis. In: GeoCongress 2008, New Orleans, LA, USA, 9-12 March 2008, pp 191-198
- Glade, T., Anderson, M. and Crozier, M.J (Editors), 2005. Landslide Hazard and Risk. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England. 802 pp.
- Glade, T. 2000. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "antecedent daily rainfall model". *Pure and Applied Geophysics* 157 (6-8): 1059-79.

- Gokceoglu, C. 2000. Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the altindag (settlement) region in turkey. *Engineering Geology* 55 (4): 277-96.
- Gokceoglu, Candan, Harun Sonmez, Hakan A. Nefeslioglu, Tamer Y. Duman, and Tolga Can. 2005. The 17 march 2005 kuzulu landslide (sivas, turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Engineering Geology* 81 (1) (9): 65-83.
- Gomez, H., and T. Kavzoglu. 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in jabonosa river basin, venezuela. *Engineering Geology* 78 (1-2): 11-27.
- Goodman, L. 1965. On simultaneous confidence intervals for multinomial proportions. *Technometrics* 7 (2): 247.
- Gorsevski PV, Gessler P, Foltz RB (2000) Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. In: GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: Applications for the 21st Century, Denver, CO, USA, 25–27 Sept 2000
- Gorsevski, P., P. Jankowski, and P. Gessler. 2006a. An heuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics* 35 (1): 121-46.
- Gorsevski, Pece V., Paul E. Gessler, Randy B. Foltz, and William J. Elliot. 2006b. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Transactions in GIS* 10 (3): 395-415.
- Gritzner, M.L., Marcus, W.A., Aspinall, R. and Custer, S.G. 2001. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, 37: 149-165
- Guiddens, 2000. En Renn, 2008.
- Gunther A. 2003. SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes. *Comput Geosci* 29:865–875
- Gupta, R., D. Kanungo, M. Arorac, and S. Sarkar. 2008. Approaches for comparative evaluation of raster GIS-based landslide susceptibility zonation maps. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10 (3): 330-41.
- Gupta, R. P., and B. C. Joshi. 1990. Landslide hazard zoning using the gis approach - a case-study from the ramganga catchment, himalayas. *Engineering Geology* 28 (1-2) (FEB): 119-31.
- Gutiérrez, R. 1919. Manizales. *Archivo Historial* Nro 6 .
- Guzzetti, F. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides* 5 (1): 3-17.
- Guzzetti, F. 2005. Landslide Hazard and Risk Assessment. *Mathematch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Bonn, Germany, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. PhD: 389.*
- Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali, and P. Reichenbach. 1999. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, central italy. *Geomorphology* 31 (1-4): 181-216.
- Guzzetti, Fausto, Paola Reichenbach, Mauro Cardinali, Mirco Galli, and Francesca Ardizzone. 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72 (1-4) (12): 272-99.
- Guzzetti, F., et al. 2000. "Comparing landslide maps: A case study in the Upper Tiber River basin, central Italy." *Environmental Management* 25(3): 247-263.
- Guzzetti, F., et al. 2006. "Estimating the quality of landslide susceptibility models." *Geomorphology* 81(1-2): 166-184.
- Guzzetti, F., et al. 2004. "Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy." *Engineering Geology* 73(3–4): 229-245.
- Guzzetti, F. 2000. "Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy." *Engineering Geology* 58(2): 89-107.
- Guzzetti, F., et al. 2007. "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe." *Meteorology and Atmospheric Physics* 98(3-4): 239-267.
- Guzzetti, F., et al. 2008. "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update." *Landslides* 5(1): 3-17.
- Habermas, J. 1984. *Theory of communicative action. Volume 1: Reason and the rationalization of society.* Translated by T. McCarthy. Boston, MA: Beacon.
- Habermas, J. 1987. *Theory of communicative action. Volume 2: System and lifeworld.* Translated by T. McCarthy. Boston, MA: Beacon.
- Hamilton County Regional Planning Commission (1976) Hillside development study—hillside development plan and strategy. Regional Planning Commission , Hamilton County, Cincinnati, Ohio, 38 pp.
- Hansen, A. 1984a. Landslide hazard analysis. In: Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 523-602.
- Hansen, A. 1984b. Engineering geomorphology: the application of an evolutionary model of Hong Kong's terrain. *Zeischrift für Geomorphologie, Supplementband* 51: 39-50.
- Hart RD. 1993. An introduction to distinct element modelling for rock engineering. In: Hudson JA (ed) *Comprehensive rock engineering*. Pergamon, Oxford
- Hartlen, J., and L. Viberg. 1988. General report - evaluation of landslide hazard. Rotherdam: A A BALKEMA.
- Heckerman, D. 1986. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factor. In: Kanal LN, Lemmer JF (eds) *Uncertainty in artificial intelligence*. Elsevier, New York, pp 298–311.
- Hermelin, M. 1985. Suelos, rocas y formaciones superficiales. *Revista DYNA* 106 : 25.
- Hewitt, K. 1997. *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*, Logman, Essex, UK.
- Hoek E, Grabinsky MW, Diederichs MS. 1993. Numerical modelling for underground excavations. *Trans Inst Min Metall Sect A* 100:A22–A30
- Hofer, A. 2003. *Karl Brunner y el urbanismo europeo en América Latina.* El Áncora Editores. Bogotá.
- Hufschmidt, G., M. Crozier, and T. Glade. 2005. Evolution of natural risk: Research framework and perspectives. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (3): 375-87.
- Humbert, M. 1977. La Cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des cartes des zones exposées. (in French).
- Hungr O. 1997. Some methods of landslide hazard intensity mapping. In: Cruden D, Fell R (eds) *Landslide risk assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 215–226

- Hungr, O. and Evans, S.G., 1996. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. *Procs.*, 7th. International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 1:233-238
- Hungr, O., y Rawlings, G., 1995, Assessment of terrain hazards for planning purposes, Cheeky fan, British Columbia, en *Memorias*, 48 Conference, Vancouver, p. 509–517.
- Hungr, O., y Evans, S.G., 2004, Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism: *Geological Society of America Bulletin*, v 116, p.1240–1252
- Hutchinson, J. 1995. *Landslide hazard assessment*. ROTTERDAM: A A BALKEMA.
- IAEG (International Association of Engineering Geology), 1976. "Engineering geological maps: A guide to their preparation". UNESCO. Press, Paris, 79 p
- IAEG Commission on Landslides. 1990 Suggested nomenclature for landslides. *Bull Int Assoc Eng Geol* 41:13–16
- IDEA, and BID. 2005. *Indicadores de riesgo de desastres y de gestión de riesgos. informe técnico principal*, ed. Banco Interamericano de Desarrollo, Instituto de Estudios Ambientales Universidad Nacional de Colombia. 2a Ed. ed.
- Iiritano, G., Versace, P. and Sirangelo, B. 1998. Real-time estimation of hazard for landslides triggered by rainfall. *Environmental Geology*, 35:2-3 275-183.
- Iida, T. 2004. Theoretical research on the relationship between return period of rainfall and shallow landslides. *Hydrol. Process.*, 18, 739-756.
- Innes, J.L. 1983. Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8: 579-588
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T. F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York: 1535.
- IRGC (International Risk Governance Council). 2007. An introduction to the IRGC risk governance framework. Policy Brief. Geneva: IRGC.
- Irigaray, C. 1990. *Cartografía de riesgos geológicos asociados a movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga)*. Unpublished Post-graduate Thesis. University of Granada, pp 390.
- Irigaray, C. 1995. *Movimientos de ladera: inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica: Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada)*. Unpublished PhD Thesis. University of Granada, Spain.
- Irigaray, C., Fernández, T. y Chacón, J. 1997. Validación de un método de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera. *Aplicación al sector de Rute*. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol.1:39-49.
- Irigaray Fernández, C., Fernández del Castillo, T., El Hamdouni, R. and Chacón Montero, J. 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 24: 537-544
- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J. 2006. Evaluation and validation of landslide susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards*, ISSN: 0921-030X (Paper) 1573-0840 (Online) DOI: 10.1007/s11069-006-9027-8.
- International Strategy for Disaster, R. 2005. "International Strategy for Disaster Reduction, 2005. Hyogo Framework for Action 2005–2015: Building the resilience of nations and communities to disasters." United Nations.
- ISDR (International Strategy for Disaster Reduction). 2009 *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. ISDR, Geneva
- ISDR (International Strategy for Disaster Reduction). 2010 *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Modelación Probabilista de Riesgos Naturales a Nivel Global. Fase 1A. Desarrollo Metodológico e Implementación de Casos Demostrativos*. ERN Evaluación de Riesgos Naturales América Latina. ISDR, Geneva
- IUGS-Working group on landslide, 1995
- IUGS, Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment, 1997. Quantitative risk assessment for slopes and landslides - The state of the art. In: D. Cruden and R. Fell (Editors), *Landslide risk assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 3-12.
- IUGS-Working group on landslide, 2001. A suggested method for reporting landslide remedial measures. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*(60): 69-74.
- Iverson RM. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour Res* 36:1897–1910
- Jaeger, C. C., O. Renn, E. A. Rosa, T. Webler.. 2001. *Risk, uncertainty, and rational action*. London: Earthscan
- Jones, F.O., Embody, D.R. y Peterson, W.L. 1961. Landslide along the Columbia river valley, Northeastern Washington. *Geological Survey Professional Paper* 367, 1-94.
- Jibson RW, Harp EL, Michael JA. 1998. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California, area. Open file report. US Geological Survey, Reston, pp 98–113
- Kanungo, D., M. Arora, S. Sarkar, and R. Gupta. 2006. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in darjeeling himalayas. *Engineering Geology* 85 (3-4): 347-66.
- Kates, R.W. 1962. Hazard and choice perception in floodplain management. Research paper No.78. Chicago, University of Chicago.
- Kates, R.W. 1971. Natural hazard in human ecological perspective: Hypotheses and models. *Economic Geography*, 47(3), Clark University.
- Kates, R.W. 1978. *Risk assessment of environmental hazard*. John Wiley & Sons. New York.
- Kates, R. W., C. Hohenemser, J. X. Kasperson (Eds). 1985. *Perilous progress: Managing the hazards of technology*. Boulder, CO: Westview.
- Kawabata, D. and J. Bandibas 2009. "Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN)." *Geomorphology* 113(1–2): 97-109.
- Kawakami, H., Saito, Y. 1984. Landslide risk mapping by a quantification method. In: *Proceedings of the IVth ISL Toronto, Canada*, Vol. 2, pp 535–540.
- Keefer, D.K., Wilson, R.C., Mark, R.K., Brabb, E.E., Brown, W.M.-III, Ellen, S.D., Harp, E.L., Wieczorek, G.F., Alger, C.S. and Zarkin, R.S. 1987. Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238: 921-925.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*. v.95. p.406-421.

- Kienholz H. 1978. Map of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000. *Artic Alp Res* 10:169–184
- Kite, G.W. 1988. Frequency and risk analyses in Hydrology. Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Ko, C., P. Flentje, and R. Chowdhury. 2003. Quantitative landslide hazard and risk assessment: A case study. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36 : 261-72.
- Kockelman, W.J. 1986. Some techniques for reducing landslide hazards. *Bulletin American Association Engineering Geologists*, 23:1 29-52.
- LA RED, and Corporación OSSO. DESINVENTAR. Sistema de inventario de efectos de desastres. 2010 [cited Nov/2010 Available from <http://online.desinventar.org/>].
- Lan, H.X., Zhou, C.H., Wang, L.J., Zhang, H.Y. and Li, R.H. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology*, 76:1-2 109-128
- Landry, J. 1979. Carte ZERMOS. Zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol. Région de Lons-le-Saunier s Poligny (Jura). Orléans, Bureau de Recherche Géologique et Minière, 14 p., map at 1:25,000 scale (in French).
- Larsen, M. C. and A. Simon. 1993. "A RAINFALL INTENSITY-DURATION THRESHOLD FOR LANDSLIDES IN A HUMID-TROPICAL ENVIRONMENT, PUERTO-RICO." *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography* 75(1-2): 13-23.
- Larsen, M. 1993. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, puerto rico. *Geografiska Annaler.Series A.Physical Geography* 75 (1-2): 13-23.
- Lavell Thomas, Allan. 1993. Ciencias sociales y desastres naturales en América Latina: un encuentro inconcluso. En: Los desastres no son naturales, compilado por Andrew Maskrey. Bogotá, La Red, ITDC, Tercer Mundo Editores. 1993, 135-154.
- Lavell Thomas, Allan. 1996. Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En: Ciudades en Riesgo; compilado por María Augusta Fernández. Bogotá, La Red. 12-42.
- Lavell, A. 2000. Draft. Annotated. Guidelines. for. Inter-Agency. Collaboration. in. Programming. for. Disaster. Reduction.,unprinted.for.Emergency.Response.División.at.UNDP.,Geneva Lavell, 2010).
- Lavell Thomas, Allan. 2000. Desastres y Desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre. El caso del huracán Mitch en Centroamérica", en Nora Garita y Jorge Nowalski (eds.), *Del desastre al desarrollo humano sostenible en Centro-américa*, BID-Centro Internacional para el Desarrollo Humano Sostenible, San José de Costa Rica, pp. 7-45
- Lee, S. 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management* 34 (2): 223-32.
- Lee, S. 2004. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at boun, korea. *International Journal of Remote Sensing* 25 (11): 2037-52.
- Lee, S., J. Ryu, J. Won, and H. Park. 2004. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology* 71 (3-4): 289-302.
- Lee, S., J. H. Ryu, M. J. Lee, and J. S. Won. 2003. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at boun, korea. *Environmental Geology* 44 (7) (OCT): 820-33.
- Lee, S., J. H. Ryu, K. D. Min, and J. S. Won. 2003. Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms* 28 (12) (NOV): 1361-76.
- Lee, Saro, and Nguyen Dan. 2005. Probabilistic landslide susceptibility mapping in the lai chau province of vietnam: Focus on the relationship between tectonic fractures and landslides. *Environmental Geology* 48 (6) (09/01): 778-87.
- Lee, Saro, and Kyungduck Min. 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at yongin, korea. *Environmental Geology* 40 (9): 1095-113.
- Lee, Saro, Joo-Hyung Ryu, Moun-Jin Lee, and Joong-Sun Won. 2006. The application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at janghung, korea. *Mathematical Geology* 38 (2): 199-220.
- Lee, Saro, and Touch Sambath. 2006. Landslide susceptibility mapping in the damrei romel area, cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology* 50 (6): 847-55.
- Lee S. 2005. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int J Remote Sens* 26(7):1477–1491
- Lee, E.M. and Jones, D.K.C. (Editors), 2004. *Landslide risk assessment*. ThomasTelford, London, 454 pp
- Lee, S. and Min, K. 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40: 1095-1113.
- Lessing, P., Kulander, B.R., Wilson, B.D., Dean, S.L., Woodring, S.M. 1976. West Virginia landslides and slide-prone areas. *West Virginia.Geol. Econ. Surv., Environ. Geol. Bull.*, 15:64.
- Londoño-Linares, J. P. 2007. Evaluación Holística de Riesgo Frente a Deslizamientos. Caso Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Manizales, Universidad Nacional de Colombia. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo.
- Londoño-Linares, J. P. 2007. "Evaluación Holística de Riesgos Frente a Movimientos en Masa en Áreas Urbanas Andinas. Una Propuesta Metodológica." *Boletín Ciencias de la Tierra* 20: 17.
- Londoño-Linares, J. P. and P. A. Cifuentes. 2010. "Análisis del crecimiento urbano: Una aproximación al estudio de los factores de crecimiento de la ciudad de Manizales como aporte a la planificación." *Gestión y Ambiente* 13(1): 13.
- Londoño-Linares, J. P., et al. 2007. "Modelización de Problemas Ambientales en Entornos Urbanos Utilizando Sistemas de Información Geográfica y Métodos Multivariantes." *Revista Internacional De Sostenibilidad, Tecnología Y Humanismo* 2007(2).
- Lowe, D. R. 1986. Lahars initiated by the 13 november 1985 eruption of nevado del ruiz, colombia. *Nature* 324 (6092): 51-3.
- Luhman, 1993. Risk: A sociological theory, New York. Aldine de Gruyter.
- Luhmann, N. 1993. Risk: A sociological theory. Translated by R. Barrett. New York, NY: de Gruyter.
- Lumb, P. 1975. Slope failures in Hong Kong. *Quaterly Journal of Engineering Geology*, 8: 31-65.
- Lupton, D., J. Tulloch. 2002. Life would be pretty dull without risk: Voluntary risk taking and its pleasures. *Health, Risk, and Society* 4 / 2: 113–124.
- Luzi, L., et al. 1995. Application of favourability modelling to zoning of landslide hazard in the Fabriano Area, Central Italy.

- Luzi, L. and Pergalani, F. 1996 Applications of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50.000 Fabriano geological map sheet). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15: 83-94.
- Luzi, L., Pergalani, F. 1996a. Application of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50.000 Fabriano geological map sheet). *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 15(2):83-94.
- Luzi, L., Pergalani, F. 1996b. A methodology for slope vulnerability zonation using a probabilistic method. In: Chaco'n J, Irigaray C (eds) *Proceedings of the Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional sobre Riesgos Naturales, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente*, vol 1, S.E.G.A.O.T., Granada, Spain, pp 537-556.
- Malamud, B., D. Turcotte, F. Guzzetti, and P. Reichenbach. 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (6): 687-711.
- MANSILLA, Elizabeth. 2000. *Riesgo y Ciudad*. Universidad Nacional Autónoma de México. División de Estudios de Postgrado. Facultad de Arquitectura.
- Mantovani, F., R. Soeters, and C. VanWesten. 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in europe. Vol. 15. [Amsterdam]: Elsevier Science.
- Marzorati, S., Luzi, L., De Amicis, M. 2002. Rock falls induced by earthquakes: a statistical approach. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 22:565-577.
- Maskrey, Andrew 1998. Navegando entre brumas. La aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina LA RED. Primera edición. Encontrado en: http://www.desenredando.org/public/libros/1998/neb/neb_todo_nov-09-2002.pdf
- Masson, Marie-Hélène, and Thierry Denoeux. 2006. Inferring a possibility distribution from empirical data. *Fuzzy Sets and Systems* 157 (3): 319-40.
- Mateo Rodríguez, José Manuel. 2002. Medio Ambiente y Desarrollo. Material de las conferencias del curso impartido en la Maestría sobre "Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto de estudios Ambientales, de la Universidad Nacional de Colombia en la Sede de Manizales, Departamento de Caldas, Colombia. Ministerio de Educación Superior de Cuba. Universidad de La Habana. Facultad de Geografía.
- Ministerio. de. Ambiente,. Vivienda. y. Desarrollo. Territorial. (MAVDT), 2005. Serie. Ambiente. y. Desarrollo. Territorial,. Guía. No.. 1:. Guía. Metodológica. para. Incorporar. la. Prevención. y. la. Reducción. de. Riesgos. en. los. Procesos.de.Ordenamiento.Territorial..Bogotá,.2005.
- May, W. L. 1997. A SAS(R) macro for constructing simultaneous confidence intervals for multinomial proportions. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 53 (3): 153-62.
- McCalpin, J., 1984. Preliminary age classification of landslides for inventory mapping, 21st Annual Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering, University of Idaho, Moscow, ID, pp. 99-111.
- Mejia-Navarro, M., Wohl, E.E. and Oaks, S.D., 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, 10(1-4): 331354.
- Melchiorre, C., et al. 2008. "Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation." *Geomorphology* 94(3-4): 379-400.
- Mendez, K. C. 2014. La Reducción del Riesgo de Desastres en la Planificación Urbana. Caso de estudio: La parroquia Caraballeda en el estado Vargas, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Tesis de grado para optar al Título de Magister en Planificación Urbana.
- Meneroud, J.P. 1978. Cartographie des risques dans les Alps-Maritimes (France). In: *Proceedings of the IIIrd I.A.E.G. Congress*, II, Chap. 46, pp 98-107.
- Miller, D. J. 1995. Coupling GIS with physical models to assess deep-seated landslide hazards. *Environ. Eng. Geosci.*, 1(3), pp 263-276.
- Montgomery, D. R., Sullivan, K., Greenberg, H. M. 1998. Regional test of a model for shallow landsliding, *Hydrol. Process*, 12, pp 943-955.
- Montgomery DR, Dietrich WE. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resour Res* 30(4):1153-1171
- Moreiras, S.M. 2004. Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza valley, Mendoza Province, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 255-266.
- Moreiras, S.M. 2005. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza valley, Argentina. *Geomorphology*, 66:1-4 345-357.
- Munich Re. 2010. Topics geo. natural catastrophes 2009. analyses, assessments, position. US version. Munich Re Group.
- Municipio de Manizales. 2003. Plan De Ordenamiento Territorial POT 2003, (2003): .
- Murphy, W., Vita_Finzi, C. 1991. Landslides and Seismicity: An application of remote sensing. In *Proc., Eighth Thematic Conference on Geological Remote Sensing*, Denver, Colo., Environmental research institute of Michigan, Ann Arbor, Vol. 2, pp 771-784.
- Naranjo, J. L. 1986. Eruption of the nevado del ruiz volcano, colombia, on 13 november 1985: Tephra fall and lahars. *Science* 233 (4767): 961-3.
- Naranjo, J. L., and P. A. Rios. 1989. Geología de manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad De Caldas* 10 (1-3).
- Nash, D. 1987. A comparative review of limit equilibrium methods of slope stability analysis, in M. G. Anderson and K. J. Richards (eds), *slope stability*, John Wiley & Sons, pp 11-75.
- Neaupane, K.M. and Achet, S.H., 2004. Use of back-propagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. *Engineering Geology*, 74(3-4): 213-226.
- Nefeslioglu, H., C. Gokceoglu, and H. Sonmez. 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology* 97 (3-4): 171-91.
- Neuland, H. 1976. A prediction model of landslips. *Catena*, 3:215-230.
- Newman, E.B., Paradis, A.R. and Brabb, E.E. 1978. Feasibility and Cost of Using a Computer to Prepare Landslide Susceptibility Maps of the San Francisco Bay Region, California. U.S. Geological Survey Bulletin, 1443.
- Nilsen, T.H. and Brabb, E.E. 1977. Slope stability studies in the San Francisco Bay region, California. *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology*, 3: 235-243.
- Nilsen, T.H., Wright, R.H., Vlasic, T.C. y Spangle, V.E. 1979. Relative slope stability and land use planning in the San Francisco Bay region, California. U.S. Geological Survey Professional Paper no 944, 96pp.
- O'Keefe P., K Westgate, B Wisner. 1976. Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature* 260 (1976): 566-567.

- Ohlmacher, G. C., and J. C. Davis. 2003. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology* 69 (3-4) (JUN): 331-43.
- Ohmori, H., and M. Hirano. 1988. Magnitude, frequency and geomorphological significance of rocky mud flows, landcreep and the collapse of steep slopes. *Zeitschrift Für Geomorphologie*(67): 55.
- Okimura, T., Kawatani, T. 1987. Mapping of the potential surface failure sites on granite mountain slopes. in V. Gardinar (ed), *International Geomorphology, Part 1*, John Wiley & Sons, pp 121-138.
- OYAGI, N. 1984. Landslides in weathered rocks and residual soils in Japan and surrounding areas: a state-of-the-art report. 4th. Int. Symp. On Landslides, Toronto, vol3, 1-31 pp. En Santacana (2001)
- OMPAD. 2003a. Comité local para la prevención, atención y recuperación de desastres. primer informe de emergencia. marzo 18 y 19 de 2003. Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres. Alcaldía de Manizales, .
- OMPAD. 2003b. Comité local para la prevención, atención y recuperación de desastres. primer informe de emergencia. octubre 28 y 29 de 2003. Oficina municipal para la prevención y atención de desastres. Alcaldía de Manizales, .
- Onodera, T., Yoshinaka, R. y Kazama, H. 1984. Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. *Proc. 2nd Int. Congress IAEG*. Sao Paulo, pp. V11.1-V-11.10.
- Oyagi, N. 1984. Landslides in weathered rocks and residual soils in Japan and surrounding areas: a state of the art report. 4th international symposium on landslides, Toronto. Vol 3: 1-31
- Pack RT, Tarboton DG, Goodwin CN. 1998. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: 8th Congr Int Assoc Eng Geol, Vancouver, Canada, 21-25 Sept 1998
- Park, N., and K. Chi. 2008. Quantitative assessment of landslide susceptibility using high-resolution remote sensing data and a generalized additive model. *International Journal of Remote Sensing* 29 (1): 247-64.
- Park, N. W., Chi, K. H. 2003. A probabilistic approach to predictive spatial data fusion for geological hazard assessment. In: *Proceedings of the IGARSS2003: IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium. Learning from earth's shapes and sizes*, pp 2425-2427.
- Parise, M. and Jibson, R.W. 2000. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake, *Engineering Geology*, 58: 251-270.
- Pasek, J., 1975. Landslides Inventory. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 12: 7374.
- Patwary, M., P. Ray, and I. Parvaiz. 2009. IRS-LISS-III and PAN data analysis for landslide susceptibility mapping using heuristic approach in active tectonic region of Himalaya. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 37 (3): 493-509.
- Perrow, C. 1999 (orig. 1984). *Normal accidents: Living with high-risk technologies*. New York, NY: Basic Books.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G., y Fell, R., 2005, Hazard characterization and quantification, en *Memorias, International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver, Canada: London, Balkema, p. 27-63.
- Pistocchi, A., L. Luzi, and P. Napolitano. 2002. The use of predictive modeling techniques for optimal exploitation of spatial databases: A case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods. *Environmental Geology* 41 (7): 765-75.
- PNUMA: 2002. La sostenibilidad del desarrollo en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades. Comisión Económica para América Latina y El Caribe. PNUMA Oficina Regional para América Latina y El Caribe. Santiago de Chile.
- Polemio, M. 1999. The role of rainfall in the landslide hazard: The case of the Avigliano urban area (southern Apennines, Italy). *Engineering Geology* 53 (3-4): 297-309.
- Popescu, M.E., 2002. Landslides causal factors and landslide remedial options. Keynote Lecture. *Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infrastructures*. Singapore, pp 61-81.
- Pradhan, Biswajeet, and Saro Lee. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software* 25 (6) (6): 747-59.
- Pradhan, Biswajeet, Saro Lee, and Manfred F. Buchroithner. 2010. A GIS-based back-propagation neural network model and its cross-application and validation for landslide susceptibility analyses. *Computers Environment and Urban Systems* 34 (3) (MAY): 216-35.
- PREDECAN, 2009. SERIE: Experiencias significativas de desarrollo local frente a los riesgos de desastres. La gestión local del riesgo en una ciudad andina: Manizales, un caso integral, ilustrativo y evaluado. COLOMBIA. <http://www.comunidadandina.org/predecana/doc/libros/SISTE22/CO/CO+MANIZALES.pdf>
- Radbruch, D. H. 1970. Map of relative amounts of landslides in California. US geological survey open-file report 70-1485, 36 pp, map scale 1:500.000. US Geological Survey, .
- Radbruch, D. H., Crowther, K. C. 1973. Map showing areas of estimated relative susceptibility to landsliding in California. US Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I-747, scale 1:1,000,000.
- Regmi, N., J. Giardino, J. Vitek, and V. Dangol. 2010. Mapping landslide hazards in western Nepal: Comparing qualitative and quantitative approaches. *Environmental Engineering Geoscience* 16 (2): 127-42.
- Reichenbach, P. 1998. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber river basin (central Italy). *Environmental Geology* 35 (2-3): 146-59.
- Remondo, J., J. Bonachea, and A. Cendrero. 2008. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. Vol. 94. [Amsterdam]: Elsevier Science.
- Remondo, J., J. Bonachea, and A. Cendrero. 2005. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: From landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides* 2 (4) (DEC): 321-8.
- Remondo, Juan, Alberto González, José Ramón Díaz De Terán, Antonio Cendrero, Andrea Fabbri, and Chang-Jo F. Chung. 2003. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazards* 30 (3): 437-49.
- Renn, O. 2008a. Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review. Part 1. Disciplinary Risk Concepts. *GAIA* 17/1 2008. 50-66. www.oekom.de/gaia
- Renn, O. 2008b. Concept of Risk: An Interdisciplinary Review. Part 2. Integrative Approaches. *GAIA* 17/2 2008. 196-204. www.oekom.de/gaia
- Renn, O. 2005. Risk governance: Towards an integrative approach. White Paper no 1, with an annex by P. Graham. Geneva: IRGC (International Risk Governance Council).
- República de Colombia. 2012. Ley 1523 de 2012. Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre.

- República de Colombia. 1989. Decreto 919 de 1989. Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres.
- Restrepo, I. 1995. 50 años del desarrollo económico en Manizales.
- Roberds, W., and K. Ho. 1997. A quantitative risk assessment and risk management methodology for natural terrain in Hong Kong. NEW YORK: AMER SOC CIVIL ENGINEERS.
- Robledo, J. E. 1996. La ciudad en la colonización antioqueña. Universidad Nacional de Colombia.
- Ruff, M., and K. Czurda. 2008. Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the eastern alps (Vorarlberg, Austria). Vol. 94. [Amsterdam]: Elsevier Science.
- Saha, A. K., M. K. Arora, R. P. Gupta, M. L. Virdi, and E. Csaplovics. 2005a. GIS-based route planning in landslide-prone areas. *International Journal of Geographical Information Science* 19 (10) (NOV): 1149-75.
- Saha, A. K., M. K. Arora, R. P. Gupta, M. L. Virdi, and E. Csaplovics. 2005b. GIS-based route planning in landslide-prone areas. *International Journal of Geographical Information Science* 19 (10) (NOV): 1149-75.
- Saha, A. K., R. P. Gupta, and M. K. Arora. 2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing* 23 (2) (JAN): 357-69.
- Saha, A. K., R. P. Gupta, I. Sarkar, M. K. Arora, and E. Csaplovics. 2005a. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation - with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2 (1) (APR): 61-9.
- Saha, Ashis K., Ravi P. Gupta, Irene Sarkar, Manoj K. Arora, and Elmar Csaplovics. 2005b. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2 (1): 61-9.
- Santacana, N. 2001. Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartografía ETSECCPB., Universidad Politécnica de Cataluña.
- Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A. y Marturià, J. 2003. Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a La Pobla de Lillet (Pirineo Oriental). En F.J. Ayala y J. Corominas (eds). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamento y aplicaciones en España. IGME. Madrid. Pp. 55-82.
- Santacana, N., B. Baeza, J. Corominas, A. De Paz, and J. Marturià. 2003. A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in the Pobla de Lillet area (eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards* 30 (3) (Nov): 281-95.
- Scott, G.R. 1972. Map Showing Landslides and Areas Susceptible to Landslides in the Morrison Quadrangle, Jefferson County, Colorado. U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I-790-B, scale 1:24,000.
- Schmid, R. H., MacCannel, J. 1955. Basic problems, techniques and theory of isopleth mapping. *J. Am. Stat. Assoc.*, 50(269):220-239.
- Schmidt, J. 2008. Probabilistic forecasting of shallow, rainfall-triggered landslides using real-time numerical weather predictions. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8 (2): 349-57.
- Schuster, R., and L. Highland. 2007. The third Hans Cloos lecture. urban landslides: Socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66 (1): 1-27.
- Schuster, R.L., Kockelman, W.J. 1996. Principles of landslide reduction. In: Turner, A.K and Schuster, R. L. (eds), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, 91-103.
- Schuster RL, Leighton FB. 1988. Regulations in California, USA. In: Kozlovskii EA (ed) *Landslides and mudflows*, UNESCO/UNEP, Moscow, 2:116-122.
- Serna, C.A. 2011. La naturaleza social de los desastres asociados a inundaciones y deslizamientos en Medellín (1930-1990). *Revista Historia Crítica*. Departamento de Historia. Facultad de Ciencias Sociales. Universidad de Los Andes. Enero - Abril 2011. Páginas: 198-223. DOI: <http://dx.doi.org/10.7440/histcrit43.2011.11>. Bogotá.
- Short, J. F. 1984. The social fabric of risk: Toward the social transformation of risk analysis. *American Sociological Review* 49: 711-725.
- Short, J. F., L. Clarke. 1992. Social organization and risk. In: *Organizations, uncertain ties, and risk*. Edited by J. F. Short, L. Clarke. Boulder, CO: Westview. 309-332.
- Shortliffe, E. H., Buchanan, G. G. 1975. A model of inexact reasoning in medicine. *Math Biosci* 23:351-379.
- Shou, K. -J. 2003. Analysis of the Chiufengshan landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Engineering Geology* 68 (3-4): 237-50.
- Sidele, R.C., Pearce, A.J., y O'Loughlin, C.L. 1985. Hillslope stability and land use. *American Geophysical Union. Water Resources Monograph*, 11: 140 pp.
- Sidele, R. C. 1992. A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Water Resour. Res.*, 28(7), pp 1897-1910.
- Sidele, R. C., Dhakal, A. S. 2003. Recent advances in the spatial and temporal modeling of shallow landslides. In *Integrated Modeling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solution*. Proc. Of MODSIM 2003, vol. 2, pp 602-607, Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Inc., Canberra, Australia.
- Sidele, R. C., Wu, W. 1999. Simulating effects of timber harvesting on the temporal and spatial distribution of shallow landslides. *Z. Geomorphol. N.F.*, 43, pp 185-201.
- SIMMA. 2014. Sistema de Información de Movimientos en Masa Registrados en Colombia. Servicio Geológico Colombiano. <http://zafiro.ingeoimas.gov.co/simma/default.aspx>
- Simoni S, Zanotti F, Bertoldi G, Rigon R. 2008. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTOP-FS. *Hydrol Process* 22:532-545
- Simons, D. B., Li, R. M., Ward, T. J. 1978. Mapping of potential landslide areas in terms of slope stability. Fort Collins, Colorado. Civil Engineering Dept., Colorado State University, pp 75.
- Singh, A. 2010. Landslide management: Concept and philosophy. *Disaster Prevention and Management* 19 (1): 119-34.
- Skempton, A.W. 1964. Long term stability of clay slopes. *Geotechnique*, 14: 75-105.
- Soeters, R. and van Westen, C.J., 1996. Slope Instability. Recognition, analysis and zonation. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), *Landslide: Investigations and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board. National Research Council. National Academy Press., Washington, D.C, pp. 129-177.

- Stark, C., and N. Hovius. 2001. The characterization of landslide size distributions. *Geophysical Research Letters* 28 (6): 1091-4.
- Stead D, Eberhardt E, Coggan J, Benko B. 2001. Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis: applications and limitations. In: *LANDSLIDES—Causes, Impacts and Countermeasures*, Davos, Switzerland, 17–21 June 2001, pp 615–624
- Stevenson, P.C. 1977. An Empirical Method for the Evaluation of Relative Landslide Risk. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 16: 69-72.
- Suarez, J. 2009. *Deslizamientos Volumen I: Análisis Geotécnico*. Publicaciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 582p.
- Süzen, M.L. and Doyuran, V. 2004a. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45:5 665-679.
- Süzen, M. L. and V. Doyuran. 2004b. "Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey." *Engineering Geology* 71(3–4): 303-321.
- Swanston, D.N. and Schuster, R.L. 1989. Long-term landslide hazard mitigation programs: Structure and experience from other Countries. *Bulletin American Association of Engineering Geologists*, 26:1 109-113.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240(4857):1285–1293
- Tangestani, M. 2009. A comparative study of dempster-shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: An experience from zagros mountains, SW iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 35 (1): 66-73.
- Temesgen, B., et al. 2001. "Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia." *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science* 26(9): 665-675.
- Terlien, M.T.J., van Westen, C.J. and Asch, T.W.v., 1995. Deterministic modelling in GIS-based landslide hazard assessment. In: A. Carrara and F. Guzzetti (Editors), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 57-77.
- Terlien, M. T. J. 1996. Modeling spatial and temporal variations in rainfall triggered landslides. Ph. D thesis, ITC Publ. Nr. 32, Enschede, The Netherlands, pp 254.
- Terlien, M. 1997. Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of manizales (colombia). *Geomorphology* 20 (1-2): 165-75.
- Tsai, T. 2008. Numerical modeling of rainstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils. *Environmental Geology* 55 (6): 1269-77.
- UN-HÁBITAT. 1996. *Un mundo en proceso de urbanización: informe mundial sobre los asentamientos humanos*, Tercer Mundo/Inurbe/FNA, Bogotá.
- UNDP (United Nations Development Programme). 2004. *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development*. New York.
- UNDP. 2007. *Human Development Report: Fighting Climate Change*. UNDP, New York, NY.
- ISDR (International Strategy for Disaster Reduction). 2009. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. ISDR, Geneva
- UNESCO-WP/WLI, 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* (47): 53-57.
- UNESCO-WP/WLI, 1993. *Multilingual Landslide Glossary*. Bitech Publishers Ltd, Richmond, 34 pp
- UNESCO-WP/WLI, 1994. A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* (50): 71-74.
- United Nations. 1994. *Yokohama strategy and plan of action for a safer world: Guidelines for natural disaster prevention, preparedness, and mitigation*. Paper Read at World Conference on Natural Disaster Reduction, at Yokohama.
- U.S. Geological Survey. 1982. Goals and tasks of the landslide part of a ground failure hazard reduction program. U.S. Geological Survey Circular 880, 44 p.
- Valencia, A. 1990. *Manizales en la dinámica colonizadora, 1846-1930*. Manizales: Fondo editorial de la Universidad de Caldas.
- Van Asch, Th.W.J., Kuipers, B. and van der Zanden. 1993. An information system for largescale quantitative hazard analysis on landslides. *Zeischrift für Geomorphologie N.F., Supp.Bd., 87*: 133-140.
- Van Asch, T. 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology* 30 (1-2): 25-32.
- Van Beek LH. 2002. Assessment of the influence of changes in landuse and climate on landslide activity in a Mediterranean environment. Ph.D. thesis, University of Utrecht, Utrecht, p 363
- Van Westen, C.J., 1993. Remote Sensing and Geographic Information Systems for Geological Hazard Mitigation. *ITC-Journal*, 4: 393-399. Van Westen et al., 1993;
- Van Westen, C.J. 1994. GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. In: Price, M.F. and Heywood, D.I. (eds.) *Taylor and Francis*, London, 135-165.
- Van Westen, C. J. and M. T. J. Terlien. 1996. "An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia)." *Earth Surface Processes and Landforms* 21(9): 853-868.
- Van Westen, C. J. 2000. The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics* 21 (2-3): 241-55.
- Van Westen, C.J. and Lulie Getahun, F., 2003. Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models. *Geomorphology*, 54(1-2): 77-89.
- Van Westen, C.J., van Asch, T.W.J. and Soeters, 2005. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Online First: 18.
- Van Westen, C. J., et al. 2006. "Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult?" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65(2): 167-184.
- Varnes, D.J. 1978. "Slope movement types and processes". Capítulo 2 de "Landslides Analysis and Control". Transportation Research Board. National Academy of Sciences. Washington, D.C.
- Varnes, D. J., et al. 1984. "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice." *The UNESCO Press*: 63-63.
- Varnes, D. J., and IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. 1984. *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. The UNESCO Press: 63.

- Vecchia, O. 1978. A simple terrain index for the stability of hillsides or scarps. In: Geddes J. D. (ed) Large ground movements and structures. Wiley, New York Toronto, pp 449-461.
- Voight, B. 1989. Materials science law applied to time forecast of slope failure. *Landslide News*, 3: 8-11.
- Vos, F., J. Rodriguez, R. Below, and D. Guha-Sapir. 2010. Annual disaster statistical review 2009: The numbers and trends. brussels: CRED; 2010. Brussels, Belgium: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Université catholique de Louvain, .
- Wachal, D. J., Hudak, P. F. 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *Geol. Journal* 51:245-253.
- Wang KL, Lin MI. 2010 Development of shallow seismic landslide potential map based on Newmark's displacement: the case study of Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Environ Earth Sci* 60:775-785
- Wang, H., and K. Sassa. 2005. Comparative evaluation of landslide susceptibility in minamata area, japan. *Environmental Geology* 47 (7): 956-66.
- Ward, T.J., Li, R.M. and Simons, D.B. 1981 Use of a mathematical model for estimating potential landslide sites in steep forested drainage basins. *IAHS Publication* 132: 21-41.
- Ward, T.J., Li, R.M. and Simons, D.B. 1982. Mapping landslides in forested watersheds. *ASCE Journal Geotechnical Engineering Division*, 8: 319-324.
- White, G.F. 1945. Human adjustment to floods: a geographical approach to the flood problem in the U.S. Research Paper 29. Department of Geography, University of Chicago.
- White, G.F. 1964. Choice of adjustment of floods. Research paper 93. Department of Geography. University of Chicago.
- White, G.F. 1973. Natural Hazards Research. Directions in Geography, R. Chorley (Ed.), 193-216. London.
- Wieczorek GF. 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bull Assoc Eng Geol* 21(3):337-342
- Wieczorek, G., G. Mandrone, and L. DeCola. 1997. The influence of hillslope shape on debris-flow initiation. NEW YORK: AMER SOC CIVIL ENGINEERS.
- WILCHES-CHAUX Gustavo. 1995. Desastres y el Medio Ambiente. 2° edición Programa de Entrenamiento para el Manejo de los Desastres DMTP1999
- Wilches-Cháu, Gustavo. 1993. La Vulnerabilidad Global. En: Los Desastres no son naturales. Compilado por Andrew Maskrey. Bogotá. La Red, ITDC, Tercer Mundo Editores, 1993. 9-50.
- Wijkman, A.; Timberlake, L. 1984. Natural Disasters; Acts of God or Acts of Man? Earthscan.
- Winchester, P. 1992. Power, Choice and Vulnerability: A Case Study in Disaster Mismanagement in South India, James and James, London.
- WMO, 2015. World Weather Information Service. Official Forecasts. <http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=875>
- World Bank, 2013. Managing Disaster Risks for Resilient Development. <http://www.worldbank.org/en/results/2013/04/12/managing-disaster-risks-resilient-development> "Reducing disaster risk. A Challenge for Development",
- Wold, R.L. Jr. and Jochim, C.L. 1989. Landslide loss reduction – a guide to state and local government planning. United States Federal Emergency Management Agency, Earthquake Hazards Reduction Series, 52: 50 p
- Wu, W. 1993. Distributed slope stability analysis in steep, forested basins. Ph. D. thesis, Utah State Univ., Logan, pp 148.
- Wu, W., Sidle, R. C. 1995. A distributed slope stability model for steep forested hillslopes. *Water Resour. Res.* 31, pp 2097-2110.
- Wu, W., Sidle, R. C. 1997. Application of a distributed shallow landslide analysis model (dSLAM) to managed forested catchments in coastal Oregon. *IAHS Publ.* 245, pp 213-221.
- Wu, T.H., Tang, W.H. and Einstein, H.H. 1996. Chapter 6: Landslide Hazard and Risk Assessment. In: Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds.) Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., National Academy Press, 106-118.
- Xie, Q. M. and Y. Y. Xia. 2004. "Systems theory for risk evaluation of landslide hazard." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(3): 445.
- Xie, M., Esaki, T. and Cai, M. 2004. A time-space based approach for mapping rainfallinduced shallow landslide hazard. *Environmental Geology*, 46:6-7 840-850.
- Yesilnacar, E., and T. Topal. 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, hendek region (turkey). *Engineering Geology* 79 (3-4): 251-66.
- Yin KJ, Yan TZ. 1988. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: Proc 5th Int Symp on Landslides, vol 2, Lausanne, Switzerland, 10-15 July 1988, 2:1269-1272
- Zhou, C. H. 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on lantau island, hong kong. *Geomorphology* 43 (3-4): 197-207.
- Zhou, G. 2003. Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS monte carlo simulation approach. *Engineering Geology* 68 (3-4): 373-86.
- Zillman, J., 1999. The physical impact of disaster. In: J. Ingleton (Editor), Natural disaster management. Tudor Rose Holdings Ltd., Leicester, pp. 320.
- Zinn, J. O., P. Taylor-Gooby. 2006. Risk as an interdisciplinary research area. In: Risk in social science. Edited by P. Taylor-Gooby, J. Zinn. Oxford: Oxford University Press. 20-53.

ANEXOS

ANEXO A

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA CIUDAD DE MANIZALES ÁREA DE ESTUDIO 2

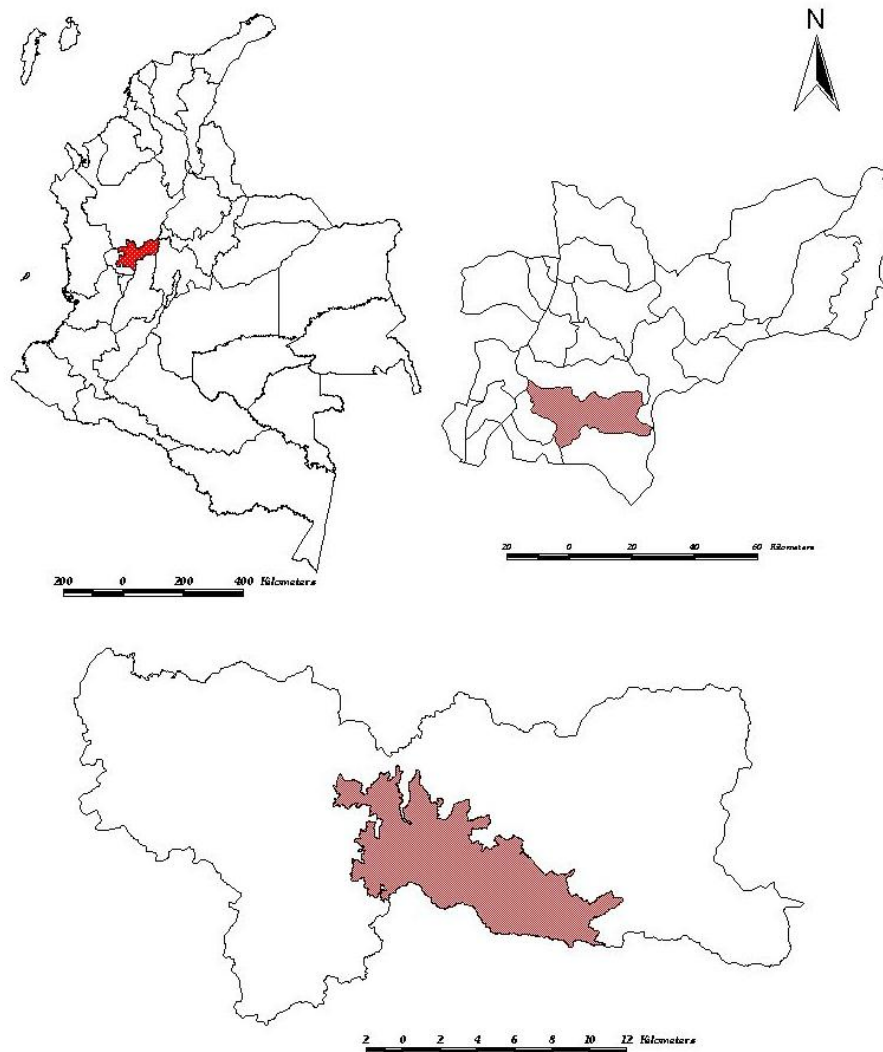
Contenido

1	INTRODUCCIÓN	3
2	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	4
2.1	DESDE LA FUNDACIÓN HASTA LOS INCENDIOS: 1848 - 1926.....	4
2.2	LA RECONSTRUCCIÓN 1925-1950.....	12
2.3	AFRONTANDO LAS MIGRACIONES URBANAS	17
2.4	80S: INCORPORACIÓN DE FACTORES DE PLANIFICACIÓN: PRIMER CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN	23

1 Introducción

Enclavada en el corazón de los Andes, en la zona montañosa colombiana, en la denominada Cordillera Central, adaptada urbanísticamente a una topografía quebrada y abrupta, Manizales, aparece como un caso muy especial de obstinación y lucha constante de sus fundadores inicialmente, y luego de sus administraciones municipales y habitantes, por generar suelos aptos para construir sobre terrenos en los cuales el sentido común se niega a edificar una ciudad.

Figura 11. Localización General de la ciudad de Manizales



Para comprender el proceso de urbanización que llevó a constituir una ciudad intermedia como Manizales, con características tan particulares (Foto 3), se hace necesario indagar en su historia, buscando elementos que expliquen este proceso. Elementos propios de amenaza como las fuertes pendientes, los tipos de suelo, la cercanía a un Volcán activo, la fuerte presencia de fallas geológicas, la alta actividad sísmica y condiciones de vulnerabilidad propias como la ubicación de familias de estratos bajos en zonas deleznales y en zonas inundables, las inadecuadas vías de comunicación que podrían dejar aislada la ciudad, la inadecuada distribución del ingreso y la educación, entre otros factores, fueron procesos que debieron tener

un período de gestación y unas causas bien definidas a lo largo de la misma historia de la ciudad, que deben estudiarse para comprender la situación de riesgo actual.

Foto 3. Vista Occidente – Oriente de la Ciudad de Manizales



2 Evolución Histórica de la ciudad de Manizales

2.1 Desde la Fundación hasta los incendios: 1848 - 1926

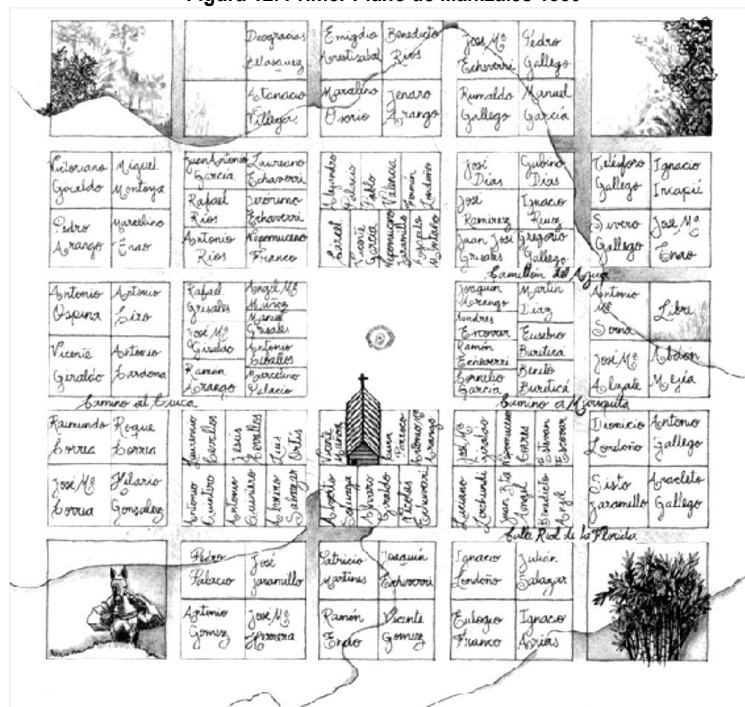
2.1.1 Selección del sitio de emplazamiento (1850-1880 La fundación)

La ciudad de Manizales surge como una de las consecuencias que deja el fenómeno de *Colonización Antioqueña*, que se dio en Colombia en el siglo XIX, buscando una expansión hacia el sur para la provincia de Antioquia, extendiéndose a los lados de la vertiente del río Cauca, zona fértil gracias a sus suelos de origen volcánico, clima favorable y la presencia de innumerables fuentes de agua, pero caracterizada por una topografía particular, de pendientes pronunciadas, suelos inestables y, adicionalmente, fuerte sismicidad. Los primeros asentamientos que se establecen tienen como finalidad convertirse en colonias agrícolas, favorecidos por la calidad del agua, los suelos fértiles y la benevolencia del clima. Inicialmente se hicieron pequeños desmontes en la selva para establecer cultivos de maíz que fueron abundantes y en pocos años generaron sobrantes que produjeron la necesidad de fundar pueblos (VALENCIA 1990).

El factor determinante para la ubicación del sitio de emplazamiento de Manizales fueron los caminos que generaban una conexión eficiente con las otras regiones del país. Se tenía como meta fundamental encontrar un lugar donde se pudiera unir en línea recta Antioquia y Cauca, regiones de marcada importancia para la época. El primer intento por seleccionar una zona de asentamiento se realizó en el sitio de la Enea (suroriente de la actual ciudad), aprovechando el agua; el segundo intento se localizó en el sector de Minitas (norte), aprovechando la cercanía al agua y las minas, pero en ninguno de los dos casos se logró una ubicación sobre el cruce de caminos. Finalmente se decidió hacer un trazado sobre el cruce de caminos entre Sonsón, Salamina y Cartago y el camino del Ruiz que conducía al oriente y comunicaba con Mariquita y Bogotá. El sitio elegido coincide con el actual centro histórico de la ciudad; una especie de hondonada que desciende hacia el norte desde el suroccidente, de buen clima, viento favorable y aguas excelentes aunque no abundantes (GUTIERREZ: 1919).

Para la segunda mitad del año 1849 (Figura 12) ya se han construido algunas casas de vara en tierra en lo que será la plaza y algunas calles. “El día 1º de enero de 1850 empezó la vida política de Manizales”. A partir de esta fecha empezó un período de 20 años, durante los cuales se crean los elementos necesarios para el futuro desarrollo económico, político y social de una ciudad naciente.

Figura 12. Primer Plano de Manizales 1850



En los primeros días de la ciudad, como es de esperarse, no se contaba con un plan o proyecto de urbanización; el crecimiento se hacía de manera espontánea, y no existían estudios sobre los posibles focos de expansión ni los terrenos más adecuados para utilizarse.

El primer intento por organizar un poco el poblado en desarrollo se da en julio de 1864, cuando el señor Rómulo Durán, primer agrimensor contratado por el alcalde con permiso y según solicitud del Cabildo de Manizales, presenta el informe de su trabajo. En este informe se dan recomendaciones funcionales, y por primera vez se plantea la intervención directa sobre el terreno para modificar la topografía y facilitar la construcción. (BARRENECHE: 2003, 24-25).

2.1.2 La lucha contra la topografía desde 1865

La topografía de la ciudad es una característica de análisis determinante en el crecimiento y configuración de la misma, en su evolución histórica, arquitectónica y la conformación de escenarios de riesgos. La ciudad nace en un estrecho terreno aplanado, con una ligera pendiente en sentido occidente – nororiente. Los bordes (cuchillas) y cañadas sirven inicialmente de límites naturales para la creación de barrios, dando paso después a la formación de áreas para urbanización con la aparición de los banqueos y rellenos hidráulicos (Foto 4) para ajustar el terreno a las crecientes necesidades de espacio.

Estos tratamientos se constituyeron en una condición obligada para la intervención y construcción en la ciudad naciente, y otorgan a la ciudad características particulares en materia

urbanística y de ingeniería. El proceso de nivelación del terreno mediante la utilización de la fuerza del agua fue recomendado inicialmente por el topógrafo Rómulo Durán, quien en 1864 planteaba "efectuar el corte de colinas y el relleno de cañadas para hacer más viables las calles, pues es deseable tener un plano perfectamente horizontal" (ESCOBAR: 1997), adicionalmente, esta recomendación es acogida al pie de la letra por los dirigentes de la época, quienes buscaron derribar colinas y rellenar cañadas para rectificar el trazado y hacer las calles lo más planas posible. Esta forma de intervención del terreno se continúa durante los siguientes 100 años, dando lugar a varios eventos de accidentes por deslizamientos debidos a la variación de la pendiente de los terrenos y la alteración de las propiedades de los suelos, ya deleznable al ser de origen volcánico. El lema de la época era: "En Manizales para construir hay que hacer primero el lote".

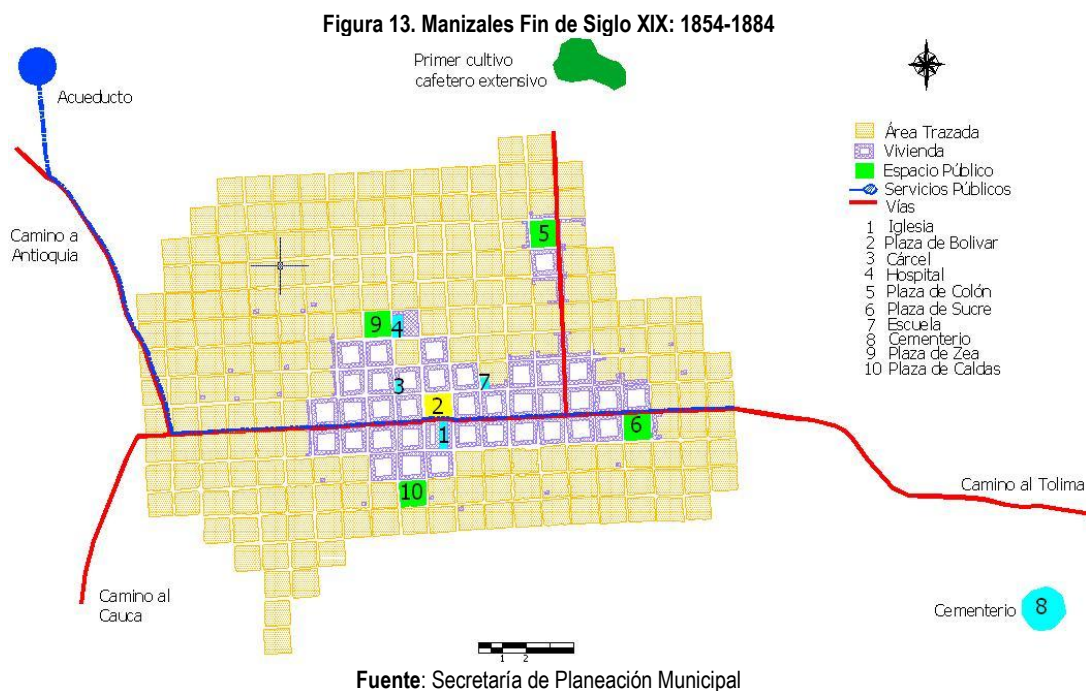
Foto 4. Ejemplo de un relleno hidráulico



El ideal de "ciudad plana" y la utilización de estos primeros tratamientos geotécnicos, trae como consecuencia el primer trazado en "damero" (cuadrícula) con la plaza al centro, y las diferentes instituciones religiosas, gubernamentales y administrativas alrededor. Se registra un crecimiento longitudinal a lo largo de la cuchilla (hoy avenida Santander) y de la Calle Real (hoy carrera 23), en la "Quiebra del Guayabo" y la Carrera de la Esponsión (hoy carrera 22), salidas hacia el Cauca, Antioquia y el Tolima, procurando "modelar la topografía". La configuración urbana de la ciudad en esa época (1854-1884) aparece en la Figura 13.

Las principales intervenciones del tipo llenos y banqueros se desarrollan fundamentalmente en dos polos hacia el año 1910 (Figura 14): El primero, localizado en el sector denominado en la época La Cuchilla o cementerio viejo, que fue la primera migración urbana fuera del centro, en la vertiente Nor-occidental, dirección del camino de los Fundadores que conducía a Antioquia, (Giraldo: 1991). La vivienda se convirtió en el uso predominante en este sector denominado "El Carangal" que finalmente es llamado Los Agustinos, rodeado por las quebradas Santa Ana, Los Agustinos y en su parte inferior por la laguna que recibe las aguas de la quebrada el Pueblo, que le dan a este terreno "la característica de fangoso y húmedo" (Giraldo: 1991). El segundo polo de intervención antrópica sobre el terreno se da en el sector de la Plaza Colón – Plaza de Mercado o Galerías, desarrollándose sobre el desagüe de la laguna (cañada de Pepe Mico). Por su localización,

favorece las actividades propias de la Plaza de Mercado (Plaza Alfonso López) al encontrarse cercana a la Plaza del Libertador - Centro dando continuidad a la malla urbana. El relleno de la antigua laguna permite conformar el terraplén de la segunda Plaza de Mercado o Galerías.



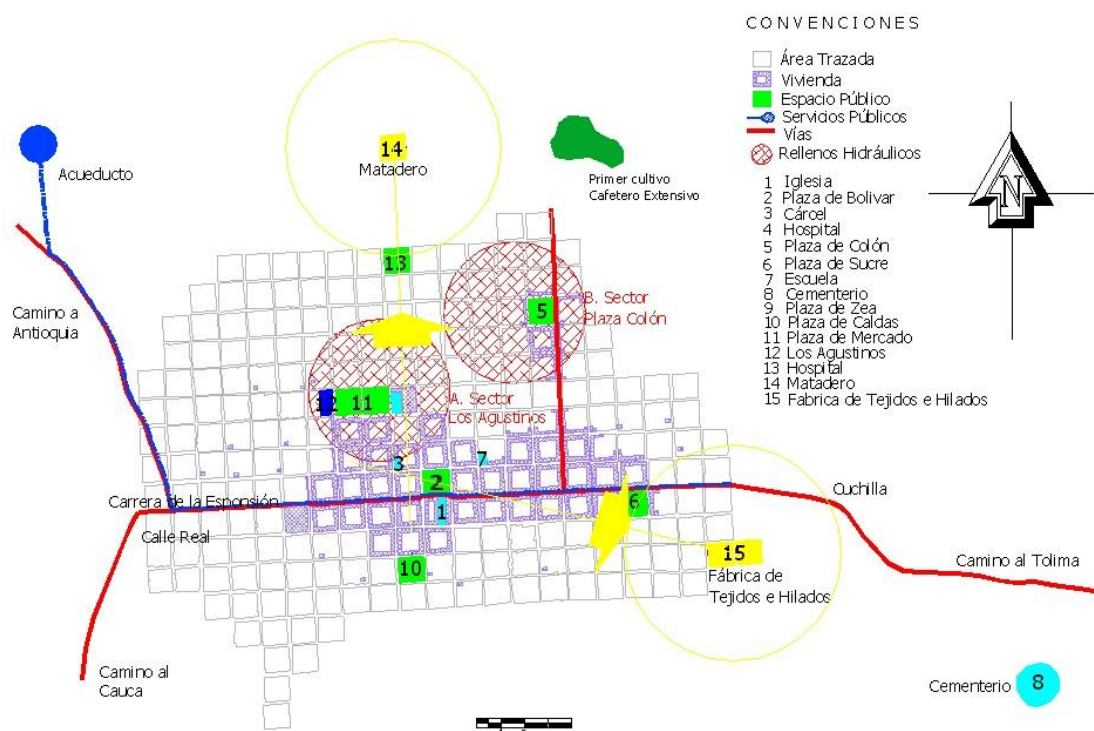
El área residencial se va conformando en la medida en que surgen nuevos elementos primarios como la Plaza de Mercado (sobre la antigua laguna), el Hospital y el Templo de los Agustinos. Estos elementos empiezan a mezclarse con el uso comercial e institucional representado en la Alcaldía y el templo parroquial, en una interacción que va fortaleciendo la morfología, e incrementando las actividades y densidades de dichos sectores. La ciudad comienza a extenderse hacia la periferia norte (matadero y carretera a Neira) y hacia la periferia sureste (fábrica de Hilados y Tejidos). Los principales ejes de crecimiento para este período histórico son la calle de la esponsión (hoy carrera 22) y la antigua carretera a Neira (hoy calle 27).

2.1.3 Auge de una ciudad naciente: Primera consolidación urbana. 1880-1924

La consolidación de una ciudad se empieza a dar respaldada por la estabilidad del precio internacional del café, principal factor de desarrollo económico en la región desde 1880 que empezaba a mostrar su poder con la solvencia económica y la generación de fortunas para algunos sectores de la población.

A la par con el crecimiento económico, el auge comercial y político, se van mejorando los caminos y vías de comunicación y se incrementa el sector industrial, respaldado por el desarrollo de la cultura sismorresistente del bahareque.

Figura 14. Focos de Expansión y Principales Sectores Intervenidos (fin siglo XIX)



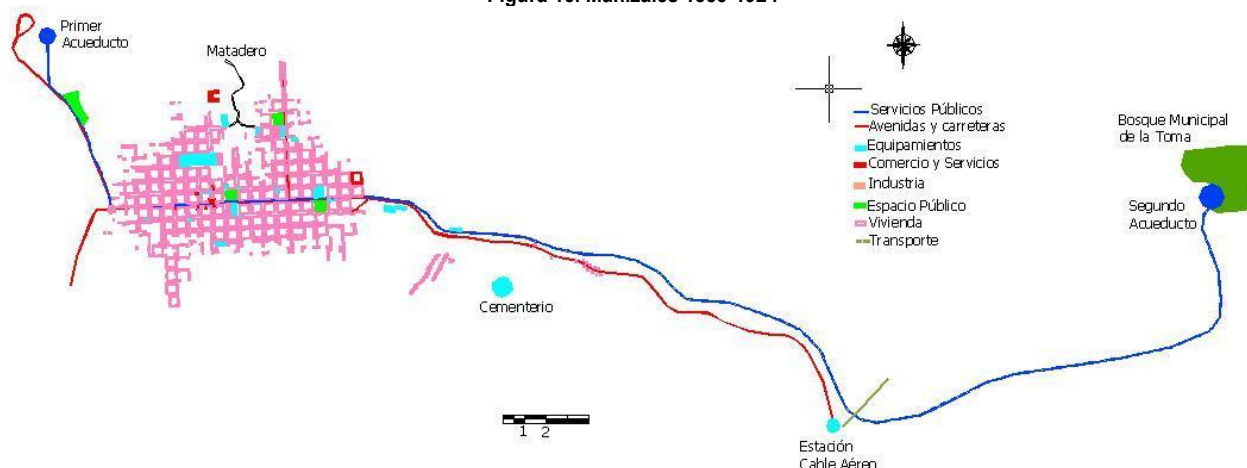
Fuente: Elaboración a partir de datos de Giraldo: 1991 – Secretaría de Planeación

La ciudad se consolida como un punto estratégico comercial, lo que trae consigo la construcción de vías carreteables como La Enea (1921), Villamaría, San Francisco (Chinchiná), Aguadas. Para mantener el transporte de mercancías y productos desde y hacia el Magdalena se construyen medios de transporte adecuados, como el Cable Aéreo Mariquita – Manizales (1922) y el Ferrocarril (1927) para conectarse con Buenaventura, nuevo punto de intercambio con el exterior.

En estas primeras décadas del siglo XX se inicia el desarrollo urbano a lo largo del "Carretero" o Avenida Cervantes, abriéndose la frontera hacia el Oriente (Instituto Universitario, Cuartel, Orfanato, Estación del Cable, Antiguo Cementerio San Esteban), a través de la cresta de la montaña, aprovechando que se trataba del terreno relativamente plano disponible (Figura 15).

El aprovechamiento del sector norte de la ciudad y la densificación urbana en ese punto se empieza a notar desde 1884, cuando se construye un acueducto y se establecen diferentes trilladoras en la zona. Esta situación, de concentración de infraestructura productiva en el sector norte de la ciudad, comienza a establecer las bases para la consolidación de una zona de habitación de la clase obrera – proletariado (más bien de niveles económicos bajos) en torno a dichos sectores.

Figura 15. Manizales 1885-1924



Fuente: Secretaría de Planeación Municipal

Con el crecimiento en importancia de la ciudad y la región como núcleo productor de Café de marcada importancia nacional, Manizales se convierte en los primeros años del siglo XX en un polo atractor de población rural, la cual ve en sus empresas y actividades la oportunidad de mejorar la situación familiar. En 1870 se registra un promedio de 10.562 habitantes de los cuales 3.890 viven en la urbe y el resto en el área rural, para 1876 la población asciende a 14.000 habitantes. En 1880 el municipio se divide en ocho fracciones o partidos: el Centro y fuera del casco urbano, de carácter rural, La Linda, La Enea, Sierra Morena, El Águila, La Trinidad, La Cabaña y el Tablazo. En 1896 el número se incrementa a 25.000 habitantes. En 1900 se establece la diócesis de Manizales y en 1905 se consolida Caldas como departamento. Para el año de 1918 la población asciende a 43.202 habitantes (RESTREPO: 1995) incrementándose en 75% con relación a 1.905. El crecimiento demográfico en estos años es vertiginoso; Manizales se convierte en la ciudad sorpresa y milagro del área andina central de Colombia, anota Muñoz (cd), y en 1.925 se tienen ya 50.000 habitantes.

Estas cifras muestran un claro crecimiento poblacional de la ciudad, exacerbado por la fuerza económica que ofrece el café, con el alto precio internacional y la facilidad de producción dada por lo fértil de los suelos y las condiciones climáticas favorables, lo cual propicia la aparición del proletariado urbano y un marcado aumento poblacional reflejado en el crecimiento perimetral de la ciudad con fuertes impactos posteriores debidos a la expansión indiscriminada y sin planificación sobre las laderas cercanas al centro.

A raíz de las fuertes migraciones poblacionales el centro de la ciudad empieza a saturarse, agotándose los terrenos aptos para construir y la administración se ve obligada a pensar en posibles opciones a la falta de espacio y al irremediable crecimiento urbano y poblacional.

En 1919 se nombra a un Ingeniero en la dirección de Obras Públicas, se construyen el parque Fundadores en 1918 y el del Observatorio en 1922, para descongestionar el centro y para apoyar el crecimiento urbano. En cuanto a vivienda, con la ley 46 de 1918 se obliga a los municipios de más

de 15000 habitantes a destinar el 2% de sus ingresos para vivienda obrera (Manizales contaba con 43202 habitantes en 1918). Por lo anterior se crea en 1921 la Caja de Vivienda Popular de Manizales, entidad que va a ser importante en la construcción de barrios para sectores obreros en el futuro. El sector privado aporta también al problema de vivienda, con el ofrecimiento en venta por parte del Arquitecto Roberto Vélez de terrenos sobre la Avenida Cervantes para la posible construcción de más de 50 casas para obreros, que contaban con la ventaja adicional de estar ubicados cerca de importantes fábricas. De esta manera se construye el barrio Vélez un año después, siendo este el primer intento por construir sobre el suelo real, es decir, adaptando la vivienda al terreno, sin transformarlo, como era tradicional con los populares llenos y banqueos. Adicionalmente es el primer barrio construido en serie en la ciudad, y también el pionero en emplazarse rompiendo con los cánones del damero tradicional. Esguerra (1993)

En 1925 Comienza el desarrollo urbanístico fuera del centro tradicional como primera expansión urbana fuera de la meseta de fundación; se rompen los cánones de la retícula ortogonal y aparecen los primeros barrios, como áreas homogéneas históricas, de acuerdo con los conceptos de "Ciudad Jardín", con trazados más "orgánicos" adaptados a las condiciones de la topografía. La tendencia de los últimos años es la del crecimiento de la ciudad hacia el sector oriental en predios cercanos a la Av. Cervantes, propiciando los orígenes del nuevo concepto de quintas en el barrio Versalles por el urbanizador Roberto Vélez Arango. Este sector se convierte en el más exclusivo de la capital, y empieza ya a ser vigente la segregación social y espacial que va a caracterizar a la mayoría de ciudades latinoamericanas. Muñoz (cd)

2.1.4 El fruto de un acelerado proceso de expansión: Haciendo frente a las amenazas. 1924 – 1926 Los Incendios

Además de la concentración urbana creciente, propia de este periodo, se debe considerar la subdivisión predial que se empezaba a desarrollar, el hacinamiento, las adiciones constructivas, los suelos flojos (fruto del propio proceso de corte y relleno), la cimentación superficial. Todos estos factores interactuando se presentan como un escenario de alta vulnerabilidad frente a incendios y deslizamientos, que constituyen el riesgo más alto en la ciudad en este período histórico. En cuanto a los sismos, se podría decir, que los sistemas constructivos empleados funcionaron bien para los frecuentes fenómenos presentados entre 1900 y 1930.

La manera de construir a finales del siglo XIX se enmarca en la denominada arquitectura colonial, con dos pisos y patios centrales descubiertos, paredes en muros de tapia de tierra pisada, piso en tierra, entresijos en madera, balcones corridos y cubiertas en teja de barro, conformando un conjunto muy rígido y con poca capacidad de disipación de energía sísmica. Este tipo de arquitectura es destruida por los primeros temblores de la época, específicamente por los de mayo de 1875, febrero y septiembre de 1878, y mayo de 1884, los cuales además afectan seriamente la estructura de la iglesia y fuerzan su demolición. Desde el evento de 1878, al ser destruidas 57 casas,

se ve la necesidad de pensar en nuevas alternativas constructivas que respondieran de una manera mas eficiente ante los cada vez más frecuentes sismos.

Se opta por imitar la tipología de una de las casas que no sufrió ningún daño en estos eventos, y desde 1884 se comienza a construir en el denominado “Estilo temblorero”, el cual presenta en su primer piso un sistema rígido representado en muros de tapia de tierra pisada y en el segundo piso un sistema liviano con muros en madera y cerramientos en tierra (bahareque en tierra), y un sobrecimiento en mampostería de ladrillo macizo de barro cocido. Esta variedad y contrastes entre rigidez y liviandad hacen que esta tecnología constructiva sea mejor que la anterior para soportar terremotos, pero no la óptima. Posteriormente se cambió la manera de construir el primer piso, fabricándolo con los mismos materiales e igual sistema del segundo piso del estilo temblorero, surgiendo así el Bahareque, compuesto por un armazón de guadua forrado por un material cuya elección depende fundamentalmente del nivel socioeconómico de cada propietario (podía ser tierra, tabla, lámina metálica, o mortero de cemento). Esta tecnología respondió de manera eficiente a la sismicidad que caracteriza la zona y se difundió, a la vez que evolucionaba con el uso de los materiales modernos como vidrio, cemento, lámina metálica galvanizada, entre otros.

El bahareque muestra sus bondades en la amortiguación de los movimientos sísmicos que ocurren en los años 1906, 1918, 1921 y 1923, reduciendo sustancialmente los daños y consecuencias. Sin embargo, este avance en la construcción sísmica es bastante vulnerable al fuego, lo cual se agrava con las precarias instalaciones eléctricas de la época, la estrechez de las vías, la deficiencia en las conducciones de agua y la inexistente infraestructura de bomberos.

En la década de los 20's suceden los tres mayores incendios en la historia de la ciudad que ocasionan significativos daños en una zona de marcada importancia social y comercial. El primero tuvo lugar el 19 de julio de 1922 y fue el mayor sucedido hasta ese entonces. El segundo incendio ocurrido durante el 3 y 4 de julio de 1925 fue el más aterrador que haya ocurrido en la ciudad y marcó el inicio de una época de transformación contundente y radical, denominada “*la reconstrucción*”, la cual se señala como una segunda fundación. Las llamas consumieron 32 manzanas del centro civil y comercial de la ciudad. La falta de preparación para afrontar este tipo de emergencias inesperadas se evidencia en el relato de Ceballos (1991):

“La conflagración tuvo origen en la Droguería Andina que estaba situada donde hoy está ubicado el Banco de Colombia, carrera 22 con calle 21 (...) El espanto de aquella noche apocalíptica creció con el continuo trepidar de la abundante dinamita que se empleó por falta de agua y de elementos bomberiles en desesperados intentos de calmar el fuego (...) el caos y la rapiña llegaron a tal punto que fueron robados hasta los pianos (...) El gobierno nacional, presidido por el General Pedro Nel Ospina se vio precisado a declarar el estado de sitio en este municipio (...) Desde la calle 23 hacia el occidente y hacia el norte con la excepción de la noble catedral de madera que milagrosamente se salvó, solo se divisaba desolación y ruinas que provocaban profunda tristeza a lo largo y ancho de las carreras 20, 21, 22, 23 y 24 hasta más allá de la calle 17, la zona más central, elegante y valiosa de la ciudad antes del inmenso desastre” (CEBALLOS: 1991, 97-98)

Apenas ocho meses después del terrible incendio de 1925, otro incendio de grandes proporciones, el 20 de marzo de 1926, redujo a escombros las dos manzanas más valiosas de la ciudad que se habían escapado al desastre anterior y la valiosa catedral.

“Este nuevo incendio que dejó otras dos manzanas totalmente destruidas además de la amada catedral, aumentó el éxodo de los habitantes hacia los principales barrios que eran San José, Los Agustinos, Hoyo Frio, La Parroquial y la Quiebra del Guayabo (carrera 22), tornándose esta última en la zona más comercial y concurrida. La conflagración del 26 aumentó considerablemente la influyente zona devastada por el enorme incendio del año 25” (CEBALLOS: 1991, 99-100)

2.2 La reconstrucción 1925-1950

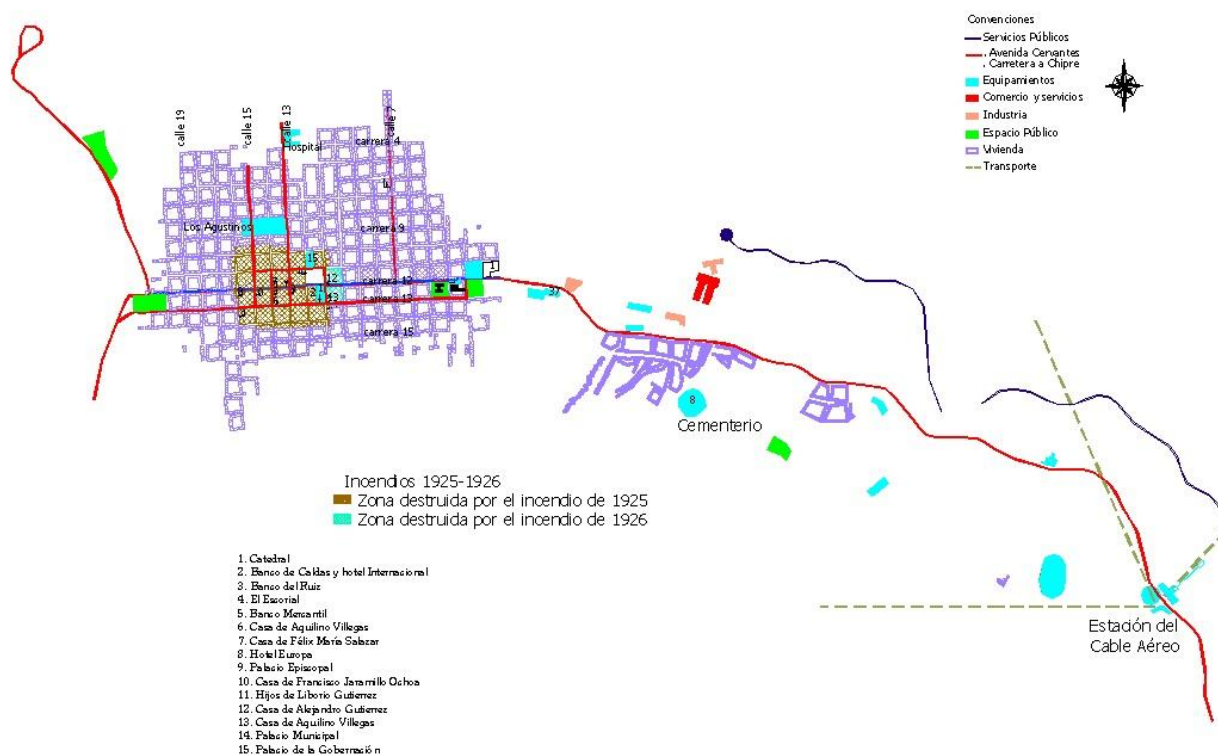
2.2.1 Cambiando la cara de la ciudad: Utilización del Concreto Reforzado

Los incendios marcan un punto de bifurcación en la historia de la ciudad. Se presenta la oportunidad de replantear el desarrollo que hasta 1926 estaba comenzando a mostrar crecientes problemas y se pone todo el empeño de la clase pudiente de la región al servicio de la reconstrucción de la ciudad.

El gobierno nacional también aporta por medio del ministro de hacienda y de obras públicas, contratando a la famosa compañía constructora Ullen&Company en 1926 para ejecutar obras primordiales para la ciudad, materializando una renovación urbana con la construcción de un acueducto moderno, un nuevo sistema de alcantarillado, la carretera a Chinchiná, el Palacio Nacional, la remodelación del accidentado relieve y la ejecución de numerosos edificios particulares, acatando el acuerdo 27 del 26 de febrero de 1926, que ordenaba dejar metro y medio a los lados de las calles y carreras en todo el poblado. CEBALLOS (1991) y reduciendo de esta manera el tamaño de las manzanas. Este decreto podría citarse como una medida de prevención de incendios que toma el municipio, pues dentro de los objetivos al ampliar el ancho de las calles estaba el de alejar los aleros entre una y otra manzana para impedir que el fuego se expandiera rápidamente.

La configuración urbana de la ciudad para la época de reconstrucción (1925 - 1935) se esquematiza en la Figura 16.

Figura 16. Manizales. 1925-1935



Fuente: Secretaría de Planeación Municipal

A raíz de los desplazamientos internos obligados por los incendios, hacia 1926 se consolida el desarrollo del centro tradicional: Hoyo Frío, Los Agustinos y Colón (San José) son los barrios que se densifican sin abandonar el trazado de damero fundacional; la ciudad sumaba cerca de 50.000 habitantes que para 1945 ascendían a 69.058 (OCAMPO 1972), fruto también de la migración del campo a la ciudad derivada de la fuerte prosperidad económica que se vivía gracias a la actividad cafetera (Para exportar el café se tenía el cable aéreo a Mariquita desde 1922 y se contaba con el ferrocarril desde 1927).

En el ámbito de la movilidad interna, se presenta la consolidación de la malla vial del centro tradicional; el eje longitudinal de la Avenida Cervantes y el eje transversal del extremo occidental (carretera a Chipre), estableciéndose como elementos estructurantes urbanos en torno a los cuales se comienza a dar el desarrollo residencial de la época; en los costados de la Avenida Cervantes, comienza la aparición de las mencionadas “casas-quintas” y equipamiento colectivo de servicios a nivel ciudad: educativos, de salud, industriales, militares, culturales, recreativos, deportivos, comerciales, religiosos, sociales; lo anterior es favorecido por la ubicación de las estaciones de El Cable y el ferrocarril sobre dicha vía.

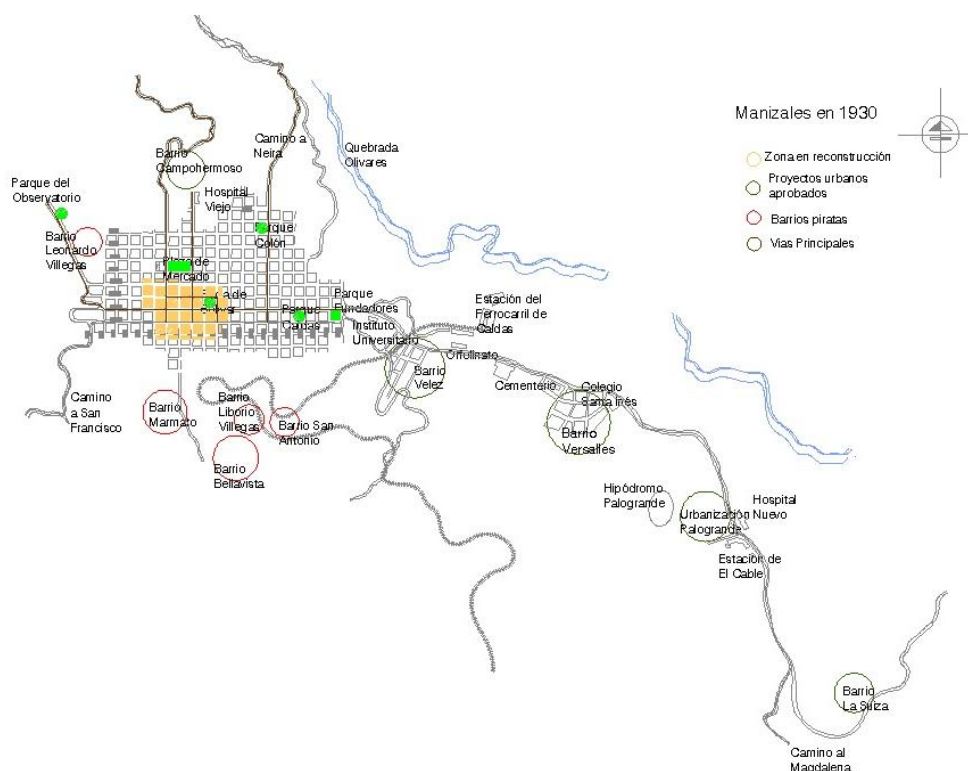
Se contrató en 1927 a la acreditada compañía italiana Pappio & Bonarda para desarrollar los planos de la nueva catedral, concebidos por el arquitecto francés Julián Auguste Polty para dotar a la ciudad de un símbolo propio que la identificara. Pappio&Bonarda ejecutaron también otras obras de envergadura como el teatro Olimpia, el edificio Sáenz, entre otros. (CEBALLOS: 1991, 103).

La reconstrucción del centro histórico e inicios de la expansión de la ciudad son respaldados por criterios arquitectónicos e ingenieriles academicistas como consecuencia del ejercicio profesional de los primeros arquitectos e ingenieros extranjeros, nacionales y locales. Muñoz (???). La mano de obra nacional también participó de la reconstrucción con los ingenieros colombianos José María Gómez Mejía y Benjamín Dussan, y el arquitecto Pablo de la Cruz, así como todos los constructores y carpinteros de Manizales. El resultado: el más armónico conjunto urbano de Colombia. (BARRENECHE: 2003)

En este período surge una arquitectura denominada “de transición” entre estilos propios de la colonización antioqueña y el concreto reforzado. Para las nuevas edificaciones se utilizan tecnologías constructivas modernas con base en estructuras de concreto reforzado y mampostería de ladrillo, buscando incorporar criterios sismorresistentes y suplir además los problemas que había demostrado el bahareque al ser inadecuado para soportar los incendios. En 1929 Se construye la primera gran torre de concreto reforzado en Manizales, la de la Iglesia del Sagrado Corazón (Los Agustinos).

Para 1930 la Oficina de Dirección de Obras Públicas ha levantado un plano de la ciudad donde se pueden observar los barrios existentes, los nuevos barrios en construcción o aprobados oficialmente y los barrios piratas (Figura 17). Entre los existentes se encuentran el centro, San José, Colón, Agustinos, Fundadores, Américas, Valvanera y Hoyo Frío. Entre los barrios en construcción estaban Vélez, Versalles, Lleras, Chipre, Campohermoso, Palogrande y La Suiza, y los barrios piratas eran Leonardo Villegas, Marmato, Arenales, Bellavista, San Antonio, Cervantes y Sierramorena. (BARRENECHE: 2003, 62)

Figura 17. Focos de gestación de asentamientos ilegales. Manizales: 1930



Fuente: Esguerra ¿??

En 1934 se termina la construcción de la vía a Villamaría y con la terminación de la carretera al Magdalena Manizales – Mariquita, al Occidente, a Medellín y al Norte hasta Salamina, Manizales se convierte en Centro Vial (Cabe anotar que en el país solo existen actualmente dos puntos de cruce sobre la cordillera central; uno de ellos es la vía Manizales – Mariquita, lo cual resalta la importancia de la construcción de esta vía). Este desarrollo es impulsado fundamentalmente por los comerciantes que necesitaban vender sus productos a otras regiones.

Con el crecimiento de la ciudad se empiezan a ver problemas de hacinamiento y falta de espacios públicos, además del normal deterioro de los sectores más antiguos con el surgimiento de inquilinatos. Por esta razón es creada la contribución de la valorización, la cual permite la adquisición de compromisos por parte del municipio, tendientes a mejorar las condiciones del espacio público urbano (pavimentación de calles, construcción de infraestructura, nuevas calzadas, parques, etc.).

El uso de arquitectura más moderna, apoyado en la utilización de materiales nuevos en combinación con los tradicionales deja como resultado una conformación urbana de notable unidad. Se construyen edificios en altura hasta cuatro pisos, también comienzan a aparecer en algunas edificaciones las instalaciones mecánicas como el ascensor en el Palacio Nacional (1933). En 1939 aprovechando el Centenario se construye el acueducto y se van desarrollando nuevos centros de urbanización residenciales: Palogrande, inicios de la Francia, vivienda popular y obrera, barrio Colombia, barrio Estrella. En 1940 Comienza la urbanización en Chipre Nuevo a partir de la carrera 8 hacia delante; a medida que crece se va sectorizando con diferentes nombres: Chipre

Nuevo, Barrio Popular, Bella Vista, La Cuchilla hoy Av. 12 de Octubre, Barrio de los Periodistas y Villa Pilar.

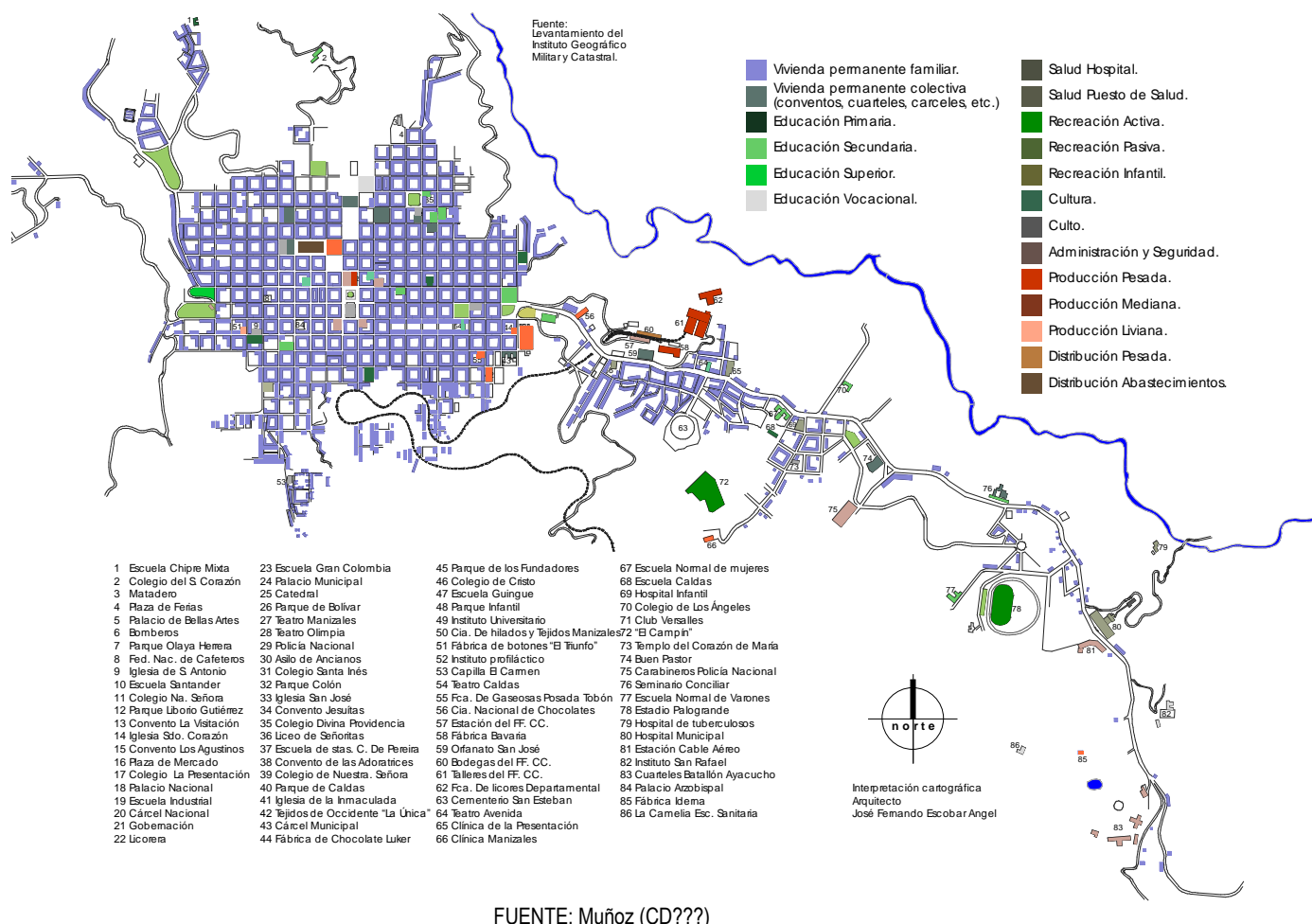
Desde este mismo año se evidencia más la necesidad de tener un plano futuro, ya que los urbanizadores están construyendo sin previa planificación, utilizando la estrategia de construir primero y dotar posteriormente a los barrios de servicios públicos. Como parte de la solución a este problema de planeación, en 1940, en el marco del primer centenario, el Concejo municipal de la ciudad invitó al urbanista Karl Brunner, de reconocida trayectoria, quien dictó una conferencia titulada “el desarrollo urbano de Manizales”, en la cual sugería ajustarse a la topografía para trazar nuevas avenidas y urbanizaciones y evitar los cortes y rellenos obsesivos para los Manizaleños, aconsejando construir sectores separados entre sí por áreas boscosas en las cuales se debería prohibir construir.

En 1945 se realiza la planimetría y loteo del barrio Santa Helena en el sector de la Clínica la Presentación. Se construye la fábrica de metal mecánica IDERNA en el sector del barrio Persia (hoy Jabonerías HADA). Estos puntos industriales van a tener importancia como polos de atracción de población, especialmente de estratos medios y bajos que servirían como empleados y obreros. En 1946 Se inicia la construcción de la Av. Centenario y con ello la urbanización del sector occidental de la ciudad, también se realiza la planimetría y loteo del barrio Palogrande, con cualidades similares a la Estrella. Se termina la construcción del edificio de apartamentos de Hernán Mejía en la esquina de la Plaza de Bolívar que constituye el primer ejemplo destacable de vivienda multifamiliar en altura (seis pisos) y en 1949 se inician construcciones en el barrio Campohermoso.

Entre los años 1940 y 1950 se destacan por su tamaño e importancia comercial para la ciudad las fábricas: Celema, Cementos de Caldas, Jabonerías Hada, Incolma, Incorsa, Muebles Metálicos Manizales, La Embotelladora de Coca Cola. Estas, al lado de pequeñas industrias y de las ya existentes, serán las encargadas de abastecer en parte las necesidades ocupacionales de la masa campesina que se radica en la ciudad, aunque, como consecuencia de su reducido número y de la incontrolable alza en la población, es evidente que no acogerán la totalidad, dejando un elevado porcentaje a manos de la industria de la construcción y, por supuesto, la siempre existente tasa de desempleo. La importancia del sector se hace evidente con la construcción de la Avenida Milán en 1949.

La Figura 18 muestra la condición de la ciudad entre los años 1936 a 1949, período de gran dinamismo urbano.

Figura 18. Plano de Manizales 1936-1949



FUENTE: Muñoz (CD???)

2.3 Afrontando las migraciones urbanas

2.3.1 Después de 1950: vivienda para la clase obrera

En 1951 Se realiza la pavimentación de los sectores Manizales – La Linda, Manizales – Villamaría y Manizales – Club Campestre, lo cual contribuye a la unidad urbana. Otra vía importante que se convierte en el mayor reto de la secretaría de obras para la época es la Avenida Paralela.

Aproximadamente a partir de 1940 la ciudad sufre un proceso acelerado de poblamiento; pasa de tener 51.025 habitantes en 1938, a tener 190.036 habitantes en 1964: en 26 años la población se incrementa en un 372%; se trata del período de más acelerado poblamiento que ha sufrido la ciudad en su historia.

Para satisfacer la creciente demanda de vivienda, el Banco Central Hipotecario B.C.H., la Caja de Vivienda Popular y el Instituto de Crédito Territorial I.C.T. empiezan a edificar barrios en la ciudad, especialmente para sectores intermedios y bajos de la población. Para solucionar el problema de escasez de dinero se traslada la construcción fuera del anillo urbano y se emplean materiales baratos, lotes pequeños, sin acabados y en algunos casos con contaminación por olores y

ruido. Adicionalmente se empleaban los diseños producidos en las oficinas centrales de cada entidad en Bogotá, lo cual configuraba urbanizaciones repetitivas, con casas idénticas.

El campo de la educación mantiene el impulso que se le ha dado desde la década anterior, principalmente en lo que a estudios universitarios se refiere; se crean al comienzo de este período las facultades de Medicina Humana y de Derecho y se cambia el nombre de Instituto Politécnico Universidad Popular por el de Universidad de Caldas. En el año de 1954 nace la Universidad Católica Femenina, que en 1955 se convierte en el Colegio Mayor de Caldas. Manizales, entonces, se establece como centro educativo para la región cafetera en general, recibiendo estudiantes no solo del Departamento de Caldas, sino también del Norte del Valle, del norte del Tolima y de regiones cercanas, lo que creará un nuevo fenómeno en la población de la ciudad. La presencia de esta nueva forma de habitantes, transitorios, exige también el aporte de la ciudadanía en lo que a vivienda, alimentación y servicios complementarios se refiere. (GIRALDO ¿?)

Las instalaciones de la unidad deportiva (terreno ocupado anteriormente por el hipódromo) determina la dirección de las nuevas urbanizaciones: Palogrande, Estrella, San Cancio, Palermo, Fátima, Belén (1957, B.C.H.).

En los años 1952 y 1953 se desarrolla la urbanización obrera de Guamal, construida por el I.C.T., que posteriormente pasa a llamarse Fátima y a abrir el camino de urbanización (ilegal al principio) de la ladera que une el sector con la quebrada Manizales.

Se inicia la construcción de la Avenida 12 de Octubre y se adelantan trabajos de acondicionamiento del terreno en Chipre. Se culmina el trazado de las vías del barrio Belén.

Mientras crece la ciudad en el sector occidental y suroriental se deterioran sectores tradicionales del centro: En 1955 El I.C.T. entrega 100 viviendas en Chipre, 15 en Alta Suiza y 5 en la Estrella y se registra a un deterioro de sectores tradicionales de vivienda en el centro de la ciudad como los Agustinos y San José.

En 1958 La parte alta del barrio La Suiza se empieza a perfilar como una zona industrial, dedicada a la fabricación de bienes de uso en el medio local y regional (dada la crisis para el sector cafetero a partir de 1929 y la dificultad de importación de este tipo de mercancías); existen ya las fábricas de Kelvinator (refrigeradores), otras de tubos y materiales, y se vislumbra la construcción de una fábrica de fósforos y otras factorías.

En 1958 el I.C.T. empieza a realizar estudios sobre la situación de las invasiones que se comenzaban a plantear como un problema serio para la ciudad en general. Se amplía la explanación en el barrio Fátima para dar cabida a los colonos que están invadiendo este sector. La Alcaldía entrega el lote para el barrio Pío XII (ya ocupado con algunas invasiones), ordenando el acondicionamiento de lotes y autorizando construcción de vivienda provisional para solucionar los problemas de invasión presentes. En 1963 Se funda El barrio Aranjuez, cerca al barrio Fátima,

consolidándose este sector como el más densamente poblado de la ciudad, especialmente por familias de estratos medios y bajos. En 1965 El I.C.T. promueve la construcción de 250 casas en el barrio Malabar. Se desarrolla la construcción de casas en pequeños grupos en el barrio Betania, sector de Fátima. En 1966 Se construyen casas en el barrio Fátima para los damnificados de los deslizamientos que se producían en los barrios marginales ya establecidos y se construye la segunda etapa del barro Betania.

En contraste, en el sector occidental de la ciudad se emprende la urbanización del barrio Centenario en inmediaciones de la Plaza de Toros con un tratamiento urbano acorde con la conformación del terreno. El desarrollo urbano del barrio se integra a la trama del centro sin mantener su trazado ortogonal. Se emprende además la urbanización del barrio la Castellana, conformándose así otro sector urbano característico debido a su aislamiento topográfico y social en relación con el contexto que lo circunda.

En cuanto a infraestructura vial En 1960 se comienza construcción de carretera Panamericana, lo cual va a impulsar aún más el poblamiento de la ladera comprendida entre la unidad deportiva y la planteada carretera panamericana.

En 1964 El I.C.T construye el conjunto de Residencias Caldas, localizado junto al actual Terminal de transportes. Se inicia la construcción de una serie de casas prefabricadas, 170 casas para obreros en el barrio La Toscana.

En esta década surgen los primeros edificios en altura no sólo en el centro de la ciudad; se termina de construir el edificio El Triángulo, localizado sobre la Av. Santander; este es el primer edificio en altura fuera del centro tradicional de la ciudad. Los edificios marcan el principio de la propiedad horizontal y configuran escenarios puntuales de fuerte densidad poblacional.

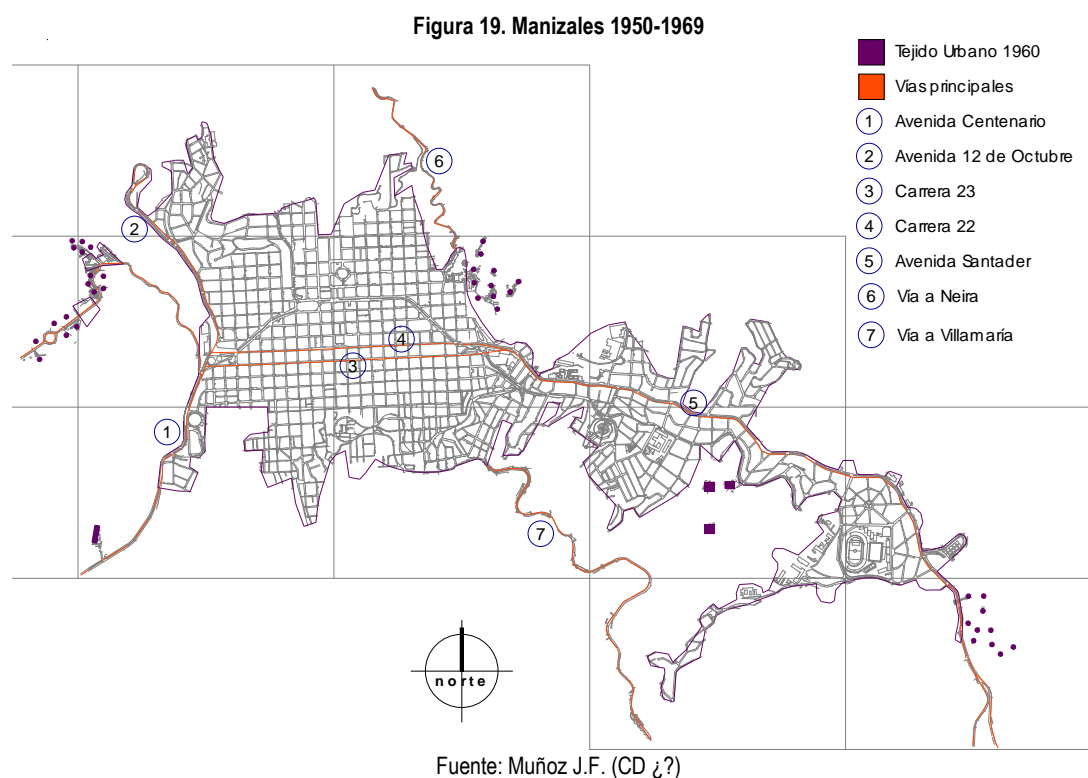
Se continúa la urbanización al oriente en el sector de la Asunción con barrios como Los Cedros, La Argentina y las Américas. Del otro lado de la Av. se continúa la urbanización del barrio Colombia y comienzan pequeños asentamientos del barrio González. Estos barrios son también promovidos por las instituciones gubernamentales como el I.C.T. y el B.C.H., dirigidos a sectores de población de recursos económicos limitados. Se construyen las primeras 50 casas en el barrio La Rambla, construcción financiada por el B.C.H.

Se emprende también la urbanización del sector nororiental de la ciudad con el barrio La Sultana (50 casas por parte del I.C.T.) y Minitas. Gracias a la cercanía de la quebrada Olivares y a partir de la zonificación se brindan áreas libres, zonas verdes y espacios recreativos de las cuales carecen las urbanizaciones de la ciudad.

Para la segunda mitad del siglo XX la ciudad sufre uno de los procesos urbanos más acelerados de su historia, registrando el mayor crecimiento en cuanto a nuevas construcciones y barrios para clases medias. La Figura 19 ilustra la situación de la ciudad entre 1950 y 1969.

2.3.2 Problemas de Acceso a la Propiedad: Aparición de barrios ilegales o piratas: (aproximadamente desde 1930 hasta 1960)

A partir de los años 30 en Manizales se empieza a dar un proceso de acelerada migración, que va a durar varias décadas, especialmente de poblaciones rurales por varias causas. Al principio, por las necesidades de empleo: La crisis de 1929 con la consecuente caída en el precio internacional del café dificulta la exportación, genera la quiebra de varios productores de grano, y propicia el aumento del sector industrial de la ciudad, pues también se hace difícil importar productos de consumo, que deben empezar a fabricarse en el medio local (Chardon 2002). Así se marca el final de toda una época en el mundo entero. Después de ella, ya nunca la ciudad tendría la dinámica que la caracterizó en sus primeros ochenta años, por lo cual su tamaño se distanciaría aún más del de Bogotá, Cali y Medellín. Muñoz (cd). Posteriormente, un segundo factor de migración se da a raíz de la denominada violencia partidista nacional entre los dos partidos políticos tradicionales: conservadores y liberales, que surge a partir del asesinato del caudillo liberal Jorge Eliécer Gaitán el 9 de abril 1948 y toma como escenario el medio rural, obligando a los campesinos a acelerar su desplazamiento a los centros urbanos.



Los sistemas de financiación de vivienda para las clases menos favorecidas a través de instituciones como el Banco Central Hipotecario, la Caja de Vivienda Popular y el Instituto de Crédito territorial no da resultado, pues los sectores de más bajo nivel socioeconómico no consiguen acogerse a este tipo de financiación, dada su precaria situación. De esta coyuntura surge una segregación social e incluso espacial cada vez mayor entre la clase media y la clase baja.

Las familias ricas de la ciudad aprovechan esta situación para emprender un doble propósito de caridad y beneficio propio: Aún contaban con lotes disponibles en terrenos cercanos al centro, en el norte de la ciudad, que al ser vendidos para urbanizar, podrían generar utilidades altas; sin embargo, los terrenos presentaban el inconveniente de ser inapropiados para la construcción en algunas de sus partes, por su abrupto relieve y cercanía a los cauces, específicamente a la quebrada Olivares. Esta situación se supera ofreciendo esas partes inapropiadas de los lotes a las familias migrantes y de estratos bajos; ello generaría asentamientos (marginales) hacia el norte de la ciudad, que llegarían a un nivel de consolidación tal, que elevara el precio de la parte aprovechable del lote, la cual sería urbanizada luego, reportando obvios beneficios a los propietarios de la tierra. Esta hipótesis del profesor José Fernando Escobar Ángel, sería la explicación del surgimiento de barrios ilegales como Estrada, Sierramorena, y González, cuyos nombres corresponderían a los apellidos de los generosos terratenientes.

La población de Manizales pasa de 51025 habitantes en 1938 a 190036 en 1964.

En 1951 comienza el proceso de deterioro de sectores tradicionales de vivienda en el centro como Los Agustinos, San José por la presencia de una masa social heterogénea y el surgimiento de los inquilinatos.

En el año 1958 el municipio entrega los predios del sector Pío XII a las familias migrantes que ya habían invadido estos terrenos de fuertes pendientes contiguos al barrio Fátima que para ese entonces ya se había construido. Así, Barrio de invasión. 1950. ya estaba Fátima

En este periodo a partir de 1963 La mencionada presencia de invasiones desde décadas anteriores, ahora forma parte de la ciudad en lo que a su perímetro se refiere y comienza una nueva etapa de la utilización de la Bambusa Guadua como material básico de construcción, hasta ahora labor de constructores populares y espontáneos (Fotos 5 y 6).

El barrio Galán surge como un asentamiento espontáneo al borde de la antigua carretera a Neira que se va consolidando con el paso del tiempo; hacia los años 1972 y 1973 se comienzan a notar las implicaciones del desordenado asentamiento de Galán en terrenos inapropiados con la recurrencia de deslizamientos que dejan damnificados.

Como solución al problema de los deslizamientos del barrio Galán se plantea por parte de la Secretaría de Planeación de la época (José Fernando Escobar, secretario de planeación) la creación del barrio El Nevado para reubicación de familias. Lamentablemente, al ser una de las primeras experiencias de este tipo no da resultado, pues se obtiene como resultado un traslado de vulnerabilidad, y en algunas ocasiones las familias reubicadas vuelven a su lugar de origen después de vender la nueva casa.

Foto 5. Ejemplo del uso de la Guadua como material de construcción



Foto 6. Vista actual de las laderas del norte de Manizales. Comuna 2



Como resulta obvio, los criterios constructivos correctos están ausentes en los barrios ilegales. Este incremento de barrios marginales se da a pesar de que en 1936 se emite la ley 61 que reforma la ley de 1918 y “aumenta los porcentajes que cada municipio debía destinar a vivienda barata” (ARANGO: 1989), y que en 1939 el gobierno nacional crea el instituto de crédito territorial, el cual a partir de 1942 empieza a financiar vivienda en el área urbana (ARANGO: 1989). Esta política estatal de financiamiento favoreció a las clases medias, pero no a quienes estaba dirigida, debido a su escaso acceso a recursos, que no alcanza para cubrir la financiación de este tipo de soluciones de vivienda, no dejando otra opción a las familias de limitados recursos que ocupar sectores peligrosos y vivir en condiciones de miseria, situación que finalmente configuran escenarios de alto riesgo en la ciudad.

Los barrios ilegales o piratas se ubican en los sectores periféricos, “en las faldas más inaccesibles y empinadas de la ciudad, hacia el norte, sur, oriente y occidente” (ESGUERRA: 1993), sobre terrenos altamente deleznable, sin acueducto ni alcantarillado, con calles angostas en las cuales caen desagües contaminados, sin espacio público, con casas malolientes, HACINADAS y mal ventiladas. Todo esto en contra de la reglamentación urbana que profririera el concejo municipal

después del incendio de 1925 (ROBLEDO: 1996), que además propugna por mantener las “cualidades intrínsecas del suelo y su comportamiento mecánico” y normaliza “técnicas constructivas y materiales que proporcionan la máxima seguridad” (APRILE-GNISET: 1992).

2.4 80s: Incorporación de Factores de Planificación: primer código de construcción

En la década de los 80 se construyen varios conjuntos multifamiliares de estratos altos: En 1980 se realiza la construcción el Edificio Torres Panorama sobre la Av. Santander en el sector oriental de la ciudad, sector que anteriormente se distinguía por su carácter residencial y hacia esta época empieza a convertirse en una zona comercial.

Se adelanta la construcción del Condominio Torrear, en Sancancio y aparecen multifamiliares cercanos, lo cual genera una imagen urbana heterogénea por la mezcla de vivienda unifamiliar y multifamiliar.

En 1981 Se crea el primer código de construcciones sismoresistente, como consecuencia del terremoto de 1979 que afecta especialmente el sector oriental de la ciudad. El Decreto 1400 de 1984, se convierte en una de las primeras medidas no estructurales de prevención de desastres y planificación urbana en el país y establece las bases para la correcta construcción de viviendas en zonas de fuerte sismicidad. Como consecuencia de esta medida se da pleno desarrollo al mito de la “casa de material”, es decir se renuncia culturalmente a la tecnología de madera o bahareque, se construyen masivamente en concreto reforzado y mamposterías de ladrillo o bloque de cemento y se acentúa la tendencia a la rigidización extrema de estas estructuras, cumpliendo con las nuevas normativas sismorresistentes

Se termina de construir por el B.C.H. la Urbanización La Leonora y se comienzan a densificar sectores sobre la avenida Santander hacia el norte con dichas construcciones.

Se adelantan en 1973 dentro del plan vial de la ciudad las obras de la Av. Paralela en el tramo Palermo – Universidad, la construcción de la Avenida del Centro en los sectores del Parque Olaya, del Parque Alfonso López y del Parque Fundadores. La intervención vial implica fuertes cambios en la morfología urbana de los mencionados sectores, muchas veces incluso con la demolición de edificaciones tradicionales.

La construcción en altura cambia el panorama del centro de Manizales con edificios como el Banco del Comercio, Bco. de Caldas, el Palacio Nacional de marcada vocación comercial y de servicios; además se dan cambios de uso de edificaciones de viviendas a servicios, con la consecuente desmejora en las condiciones históricas de habitabilidad que ofrecía el sector. Sobre la Avenida Santander se construye vivienda multifamiliar, para estratos altos, especialmente a partir de la calle 54, y se produce un cambio de uso en los primeros y segundos pisos, para comercio,

oficinas y servicios. Se consolida un centro alterno comercial, financiero y recreativo, especialmente entre las calles 58 y 63.

La necesidad de un espacio público de carácter cívico y simbólico conlleva a la remodelación de la Plaza de Bolívar, además como hecho particular, se da prelación al peatón sobre el vehículo en nuevos tratamientos del espacio público, con la semipeatonalización de la carrera 23 a lo largo del centro histórico. En general, se da una fuerte transformación en la geografía urbana por la incursión masiva de avenidas e intersecciones viales con pasos a nivel y se configura así una ciudad más ágil, con fácil movilidad.

No tarda en aparecer una considerable dispersión urbana por el desarrollo masivo de urbanizaciones periféricas al norte y nororiente de la ciudad para estratos medios y bajos y aparecen los conjuntos cerrados de vivienda unifamiliar de propiedad horizontal de estratos medio y alto sobre el sector suroriente, conectados a través de la avenida Alberto Mendoza Hoyos; acompañados de algunos equipamientos y nuevas instalaciones industriales, además del desarrollo de un centro secundario, principalmente comercial, a lo largo de la Avenida Cumanday (La Enea).

En esta época se hace evidente el trabajo continuo de CORPOCALDAS, antes CRAMSA, en el ámbito de la mitigación de riesgos, con el manejo técnico paisajístico de áreas de protección de laderas afectadas por problemas de erosión.

En urbanizaciones de vivienda de estratos bajos, el deseo de aplicar el código y construir en mampostería de ladrillo y bloque de cemento en muchos casos no ofrece los resultados esperados por la normativa, pues se desarrollan construcciones sin asistencia profesional o por sistemas de autoconstrucción, sin cumplir especificaciones técnicas normatizadas, llevando a la generación de sectores de ciudad altamente vulnerables a las condiciones naturales de sismicidad.

Para el inicio del nuevo milenio, el municipio de Manizales, cumpliendo con la Ley 388 de 1997 de Ordenamiento Territorial, estará regido en su desarrollo urbanístico, arquitectónico y ambiental por su Plan de Ordenamiento Territorial, en el cual el tema del patrimonio urbanístico y arquitectónico se reconoce como un componente básico de la estructura rururbana propuesta para el desarrollo futuro del municipio.

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Contenido

1	MECANISMOS DE MOVIMIENTO DE LADERAS	2
2	TERMINOLOGÍA EMPLEADA EN LOS MOVIMIENTOS EN MASA.....	3
3	TIPOLOGÍA DE LOS DESLIZAMIENTOS	5
4	CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.....	6
5	ACTIVIDAD DE DESLIZAMIENTOS.....	15
6	AGENTES CONDICIONANTES Y DETONANTES DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	17
7	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA APARICIÓN DE DESLIZAMIENTOS	18

1 Mecanismos de movimiento de laderas

Las fuerzas gravitacionales y la infiltración tienden a causar inestabilidad en laderas naturales y en pendientes producto de excavaciones o terraplenes. Los deslizamientos, o en un sentido más amplio, movimientos en masa, son un fenómeno del proceso de denudación, donde el suelo o material rocoso es desplazado a lo largo de pendientes, especialmente a causa de la fuerza gravitacional. El fenómeno ocurre cuando el esfuerzo cortante del material de la ladera se hace menor que el esfuerzo cortante actuando sobre ella, produciendo una falla a través de una superficie.

El término deslizamiento comprende casi todas las variedades de los movimientos en masa. Según Cruden (1991) el término es utilizado para denotar el movimiento de una masa de rocas, escombros o tierra por una pendiente. Por lo tanto, el fenómeno descrito como deslizamiento no está limitado a tierra. El término es usado en sentido más amplio.

Terzaghi definió el “deslizamiento” como un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de la masa que se desplaza se mueve hacia abajo y hacia el exterior (Terzaghi, 1950). Diversos autores han definido de manera diferente este proceso pero una definición apropiada del término deslizamiento la dan Skempton y Hutchinson (1969, en Alcántara-Ayala, 2000): “un deslizamiento es un movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca, que ocurre en una superficie de cizallamiento en los límites de la masa desplazada”.

Un deslizamiento implica el movimiento de cierto tipo de material (bloques de roca, suelo o detritos) sobre una o más superficies bien definidas, sobre las cuales se produce un movimiento de cizalla o de corte. Por esta razón el término deslizamiento es incorrecto para referirse a todos los tipos de procesos de ladera. Alcántara-Ayala (2000) propone traducir el término landslide como “movimiento del terreno”, lo que permite diferenciar cada tipo de proceso e interpretar adecuadamente cada mecanismo particular. De esta forma los términos “movimientos de ladera”, “movimientos del terreno”, “procesos de ladera” o “procesos de remoción en masa” se consideran como sinónimos y están relacionados con diversos mecanismos de movimiento, uno de los cuales es el deslizamiento.

En general se entiende por procesos de remoción en masa, como el movimiento de masas de suelo o roca de los taludes, pudiendo actuar la gravedad y/o algún medio de transporte y cualquiera que sea el mecanismo particular del movimiento.

Varnes (1978) esquematiza las características de los deslizamientos que él ha llamado flujos de tierra complejos como lo muestra la *Figura 1*.

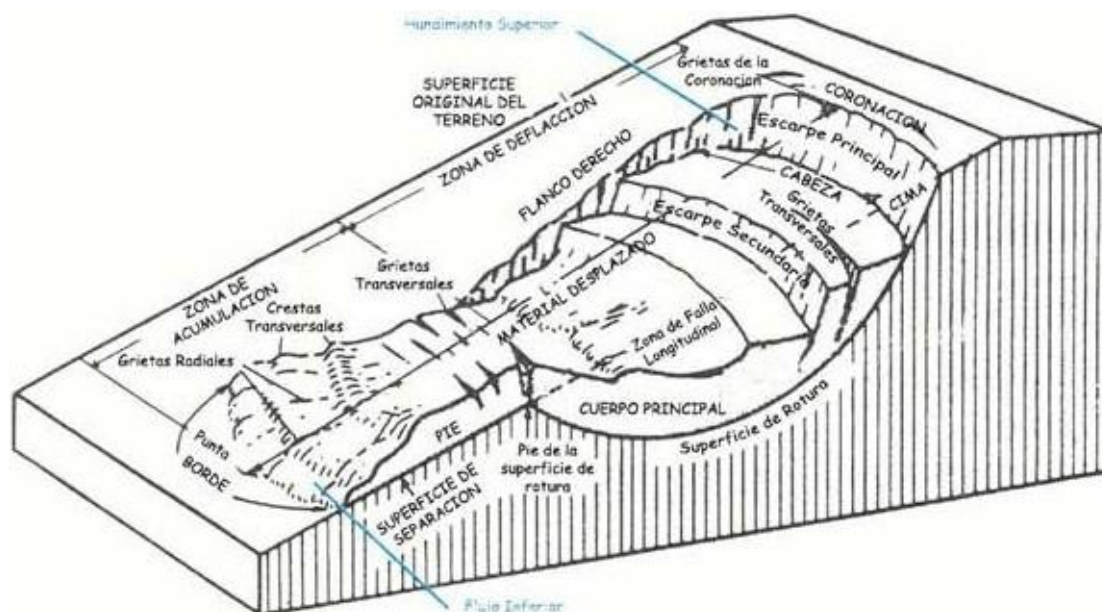


Figura 1 Diagrama idealizado de un deslizamiento complejo según Varnes, 1978

Deslizamiento en el cual la superficie deslizada se encuentra en el manto de suelo o en la roca meteorizada, típicamente de profundidad de pocos decímetros a algunos metros, conocido como deslizamiento superficial. Este tipo de deslizamientos a menudo ocurren en áreas que tienen pendientes con suelos permeables en superficie e impermeables en profundidad. La superficie impermeable atrapa el agua elevando la presión. Como la parte superior del suelo está llena de agua, se torna pesada y la pendiente puede inestabilizarse, deslizándose sobre el fondo poco permeable.

Los deslizamientos en los cuales la superficie de corte es más profunda, por debajo de las raíces de los árboles, a profundidades de más de diez metros, se denominan deslizamientos profundos. Este tipo de eventos por lo general afecta regolito profundo, roca meteorizada y/o roca firme e implica grandes taludes.

2 Terminología empleada en los movimientos en masa

Los tipos más comunes de deslizamientos tienen generalmente la siguiente estructura: un hundimiento en la parte superior de la pendiente y un deslizamiento o flujo en la parte baja de la pendiente. Según esta estructura se pueden diferenciar diversas partes del deslizamiento (ver Figura 1. 10), aunque hay que tener en cuenta que no se desarrollan de igual forma en los diferentes tipos, existiendo además particularidades propias de cada tipología.

2.1 Escarpa principal

Es la superficie con gran pendiente que aparece en la periferia del hundimiento superior. Se desarrolla debido al movimiento del material que desliza hacia abajo y hacia adentro respecto de la superficie estable, y forma parte de la superficie de rotura.

2.2 Escarpe secundario

Es una superficie escarpada de gran pendiente que se forma dentro del material desplazado y que es producida por los movimientos diferenciales que se producen en el interior de la masa deslizante.

2.3 Cabeza

Es la parte superior del deslizamiento. En ella se pueden observar las grietas de coronación previas al movimiento así como las grietas y los escarpes secundarios.

2.4 Cima

Es el punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.

2.5 Pie de la superficie de rotura

Es la intersección entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno. A veces suele estar enterrado.

2.6 Borde del material desplazado

Es el límite de material desplazado más alejado del escarpe principal.

2.7 Punta

Es el punto más lejano del deslizamiento desde la coronación.

2.8 Pie

Es la porción del material desplazado que queda pendiente abajo y no pertenece a la superficie de rotura

2.9 Cuerpo principal

Es el material perteneciente a la superficie de rotura ya desplazado, con una superficie abultada y muy irregular donde aparecen fi-acturas de flujo o tracción longitudinales según el sentido del flujo y grietas transversales, producidas por las diferencias de velocidad de los movimientos. Está situado entre el escarpe principal y el pie y la base de la superficie de ruptura.

2.10 Flanco

Es la zona lateral del deslizamiento (derecho e izquierdo)

2.11 Coronación

Es el lugar geométrico de los puntos más altos del escarpe principal, que después del deslizamiento sigue en su lugar, sin haber experimentado casi ningún desplazamiento.

2.12 Superficie de rotura

Es la superficie con planos débiles que ha ocasionado el deslizamiento.

2.13 Superficie original del terreno

Es la pendiente que existía antes de que se desencadenara el deslizamiento. En algunos casos, esta superficie pertenece a un deslizamiento anterior.

2.14 Superficie de separación

Es la superficie que limita el material desplazado del material estable sin ser la superficie de rotura

2.15 Material desplazado

Es el material que se ha desplazado de su posición original sobre la pendiente

2.16 Zona de deflación

Es el área dentro de la cual el material desplazado queda debajo de la superficie original del terreno.

2.17 Zona de acumulación

Es el área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno.

3 Tipología de los deslizamientos

A continuación se muestra en la *Tabla 1* los factores a tener en cuenta para la clasificación de las diversas tipologías de deslizamientos.

Tabla 1. Factores que influyen en la clasificación de los deslizamientos

Forma de la superficie de rotura	<ul style="list-style-type: none"> -Circular -Plana -Cónica -De Cabeza
Características del material	<ul style="list-style-type: none"> - Rocas -Suelo -Derrubios y materiales de relleno

Distancia recorrida	-De trayectos largos -De trayectos medios -De trayectos cortos
Velocidad (Schuster, Fleming, 1982)	-Extremadamente rápidos: >10m/s -Muy rápidos: 10m/s-1m/min -Rápidos: 1m/min-1m/día -Moderados: 1m/día-1m/mes -Lentos: 1m/mes – 1m/año -Extremadamente lentos: >1m/año

La terminología para referirse a los procesos de remoción ha ido evolucionando. Las clasificaciones de los PRM suele referirse a los tipos de materiales involucrados (rocas, suelos y derrubios), al mecanismo y tipo de rotura, al contenido de agua del terreno y a la velocidad y magnitud del movimiento. La clasificación más actual y aplicada a nivel internacional es la que se basa en el tipo movimiento y de material (EPOCH, 1993 en Alcántara-Ayala, 2000; Dikau *et al.*, 1996; Hutchinson, 1998; Leroueil *et al.*, 2001).

De acuerdo con esta clasificación los PRM se dividen en las siguientes clases:

Caídas (falls)
Volteos (topples)
Deslizamientos (slides)
Flujos (flows)
Expansiones laterales (spreads, lateral spreading)
Complejos (complex)

Mientras que los materiales son divididos en tres grupos:

Rocas
Detritos (partículas mayores a 2 mm)
Suelo (partículas menores a 2 mm)

De esta forma, se pueden combinar los términos para hacer mención a un mecanismo en particular y al material involucrado: flujo de suelos o detritos, caída de rocas o detritos, etc.

El “mecanismo complejo” se refiere a la combinación entre dos o más procesos.

Estas clasificaciones son de gran utilidad para abordar los PRM, ya sea para la cartografía, la descripción detallada en campo, el establecimiento de la tipología en relación con las características geológicas, morfológicas y estructurales de las laderas o bien para facilitar la comunicación entre distintas disciplinas (geología, geografía, ingeniería, protección civil).

4 Clasificación de procesos de remoción en masa

Los movimientos en masa han sido clasificados en muchos sentidos, poniendo diferentes énfasis según el método, en reconocimiento, prevención, control o corrección de las amenazas (Sidle and Ochiai, 2006). La primera gran clasificación fue la de Sharpe (1938), otras más recientes son las de Varnes (1958, 1975, and 1978), Hutchinson (1988), Nemcok et al. (1972), and Sassa (1989). Estas clasificaciones se han elaborado desde una perspectiva geomorfológica o geotécnica

y proveen descripciones detalladas de los modos de falla, materiales, velocidad, mecanismo de falla y cinemática de los deslizamientos.

El esquema de clasificación (Tabla 2) ampliamente utilizado de Varnes (1978), distingue cinco tipos de movimientos en masa como (falls, topples, slides, spreads, and flows) más combinaciones complejas de estos tipos principales. En esta clasificación, Varnes, evitó utilizar el término creep usado por Sharpe (1938); modificaciones posteriores (Cruden and Varnes, 1996) incluyeron el proceso creep en varias categorías de deslizamientos, utilizando descriptores de movimiento, como muy lento o extremadamente lento.

Tabla 2. Tipología de los deslizamientos

Movimiento de Masa	Materiales	
	Rocas	Terreno
Desprendimientos	Desprendimiento de rocas	Desprendimiento de terreno (en gravas y en arenas)
Vuelcos	Vuelcos de bloques	
Deslizamientos (propriadmente dichos)	Hundimiento de rocas Derrumbe de rocas deslizamiento de rocas	derrumbe de tierras deslizamiento de derrubios deslizamiento de bloques de terreno
Flujos	Flujo de rocas	Grava
		Arenas
		Flujos de derrubios Avalancha de derrubios corriente de rocas solifluxión reptación de suelo
		Flujo de arena flujo de terreno flujos de lodo
Extensiones laterales	Extensión lateral de rocas	Extensión lateral del terreno
Movimientos Complejos	Avalancha de rocas	Hundimiento y flujo de terreno

4.1 Caídas (Falls)

Comprende el descenso rápido y libre de bloques de roca con tamaño y forma variable, de taludes con fuerte pendiente. El movimiento puede incluir deslizamiento, rodamiento, rebotes y caída libre. Este mecanismo es común en escarpes de falla y cortes verticales, así como en taludes brechados o formados por una mezcla de bloques y matriz. El desplazamiento inicial de corte es mínimo en este tipo de movimiento y el material cae libremente o rueda por la ladera empinada en que tiene lugar (Varnes, 1996). Es un movimiento extremadamente rápido con una superficie de corte pequeña y claramente definida, y puede ser precedido o no, de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque. La observación muestra que los bloques de roca o material, tienden a moverse en caída libre cuando la pendiente superficial es mayor a 75°. En taludes con una pendiente menor, generalmente los materiales rebotan y con pendientes menores a 45° los bloques tienden a rodar (Suárez, 1998). Una vez que una roca ubicada en el talud inicia su movimiento (que incluye caída, rodamiento y rebotes), el factor más importante que controla la trayectoria de caída es la geometría del talud y el coeficiente de restitución (Giani, 1992).

Según Hutchinson (1998), las caídas se pueden subdividir en:

Primarios o desprendimiento: un desprendimiento es aquel movimiento de una porción de suelo o roca, en forma de bloques aislados o masivos que, en una parte de su trayectoria, desciende por el aire en caída libre (Figura 2), volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodamiento. Involucra material fresco que se ha separado del talud.

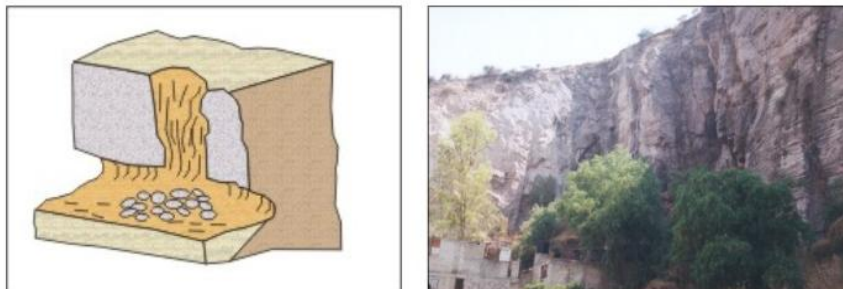


Figura 2. Caída por desprendimiento

Secundarios o rodamiento: involucra material disgregado, que ha quedado como un residuo del primario. También se puede tratar de bloques que han quedado separados de la masa rocosa y que están apoyados sobre la ladera (Figura 3).

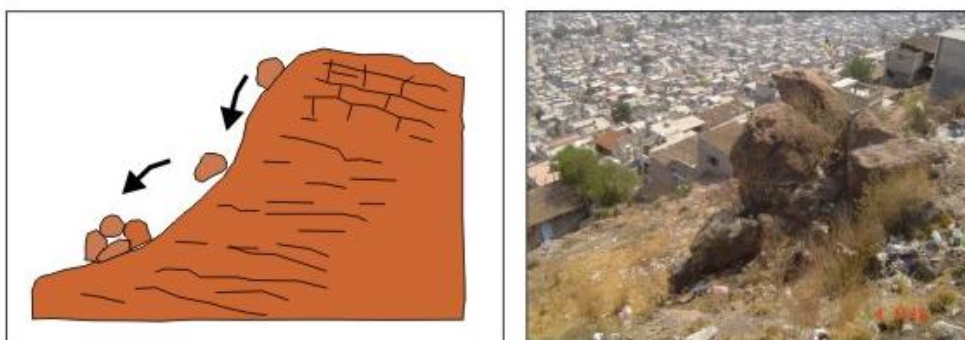


Figura 3. Ejemplo de una caída por rodamiento. En este caso se trata de bloques separados e independizados de la masa rocosa

4.2 Volcamiento

Este tipo de movimiento ocurre cuando la resultante de las fuerzas aplicadas a un bloque cae fuera de un punto que sirve como pivote en la base del mismo y alrededor del cual se produce el giro o volteo. Esta falla es común en masas rocosas con discontinuidades casi verticales. Una característica fundamental para este mecanismo de falla es la orientación de las discontinuidades, las cuales son verticales o subverticales. Cuando el echado es a favor de la pendiente se presenta el volteo de bloques y cuando el echado es en contra de la pendiente, se puede presentar volteo con flexión de las capas. Este mecanismo es común en zonas escarpadas como cantiles y cortes verticales, frentes de flujo de lava, en zonas donde aflora la traza o escarpe de fallas de tipo normal. Los tipos de inestabilidad asociados al volteo son (Hoek y Bray, 1996):

3.1.1. Volteo con flexión

Se presenta cuando un sistema de discontinuidades orientado subverticalmente y con echado en contra del talud, delimita capas o columnas semicontinuas, donde la fuerza del peso induce un

momento y los bloques tienden a flexionarse. Este mecanismo de falla puede ser inducido por erosión o excavaciones en el pie del talud (Figura 4).

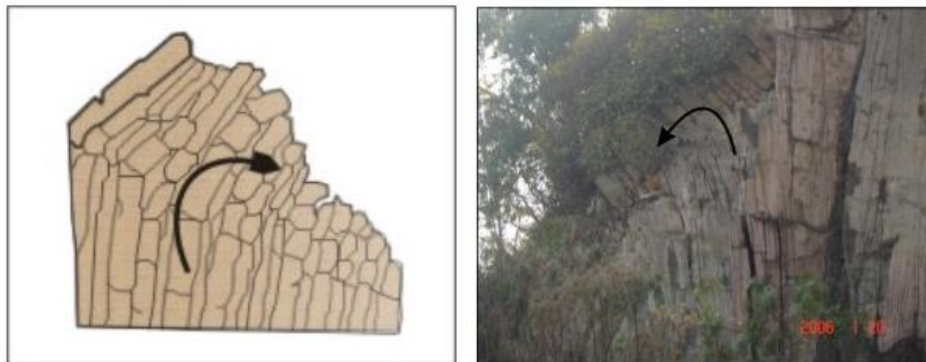


Figura 4. Volteo con flexión de estratos en una estructura dómica

4.3 Volteo de bloques (Topples)

Este mecanismo de falla ocurre cuando se trata de bloques singulares que son divididos por discontinuidades muy espaciadas y con gran apertura (Figura 5).



Figura 5. Volteo de bloques, independizados por discontinuidades de gran apertura

4.4 Deslizamientos

Un deslizamiento es un movimiento de una masa de suelo o roca causada por la superación de la resistencia al cortante del material (Varnes, 1996). El movimiento dependerá del tipo de material y sus características; no ocurre simultáneamente en toda la masa de material desplazado, se alarga a partir de un área de falla local. A menudo los primeros signos de movimiento son grietas en la superficie original. De acuerdo con la forma de la superficie de falla se subclasifican en rotacionales o traslacionales. Varnes (1978) resalta la importancia de hacer esta diferenciación para aplicar métodos de estabilidad y control.

4.4.1 Deslizamiento rotacional

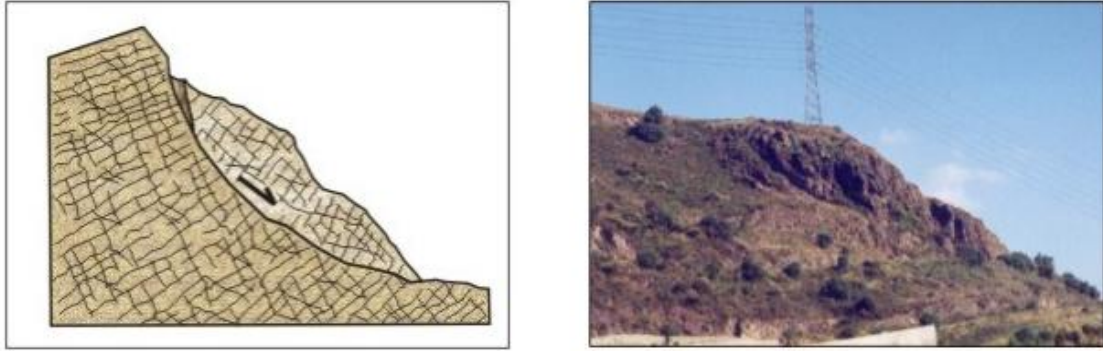


Figura 6. Deslizamiento rotacional en rocas a través de una superficie de falla curva

El movimiento se presenta por corte a través de una superficie de falla curva (

Figura 6 y Figura 7). La masa se desplaza girando alrededor de un centro de rotación. Este mecanismo es común en taludes formados por materiales arcillosos, por roca fuertemente fracturada y alterada (Hoek, 1996) o por materiales rocosos con discontinuidades circulares preexistentes, como en el caso de zonas de fallas lístricas.

De acuerdo con las etapas de movimiento y al grado de actividad, se clasifican en simples (un solo deslizamiento), sucesivos (un deslizamiento seguido de otro) y múltiples (deslizamientos inmersos dentro de uno mayor).



Figura 7. Deslizamiento rotacional en suelo a través de una superficie de falla curva (Deniyaya, Sri Lanka, 2003)

4.4.2 Deslizamiento traslacional

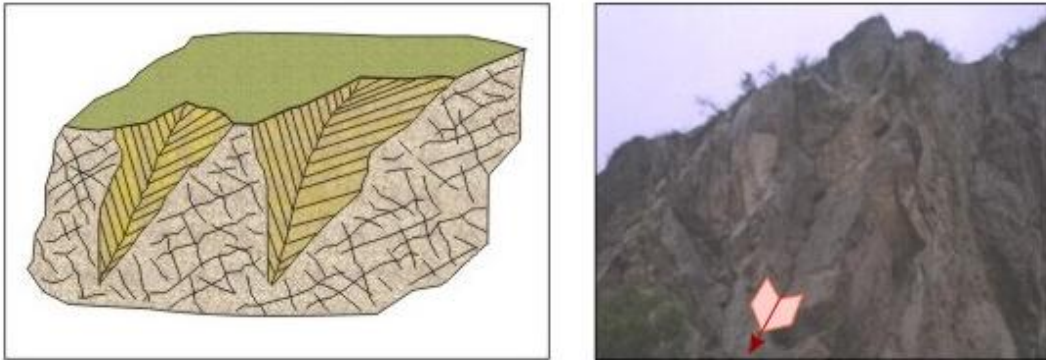


Figura 8. Ejemplo de falla plana en calizas

El movimiento se presenta a través de la línea de intersección de dos planos (deslizamiento en cuña) (Figura 8) o por corte a través de una superficie relativamente plana (deslizamiento plano) (Figura 9 Figura 10). Este mecanismo es común en masas rocosas que están afectadas por discontinuidades tales como planos de estratificación, juntas de enfriamiento, fracturas de origen tectónico, esquistosidad entre otras. Las condiciones para que se produzca este tipo de movimiento son que las discontinuidades o bien la línea de intersección, aflore en el frente del talud de manera que el movimiento sea cinemáticamente posible, además de que la resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades sea menor que las fuerzas aplicadas (peso propio, sobrecargas, fuerzas de filtración o fuerzas sísmicas).

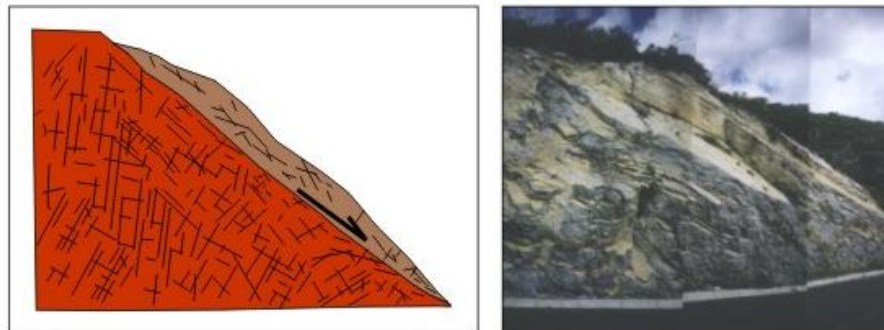


Figura 9. Ejemplo de una falla en cuña

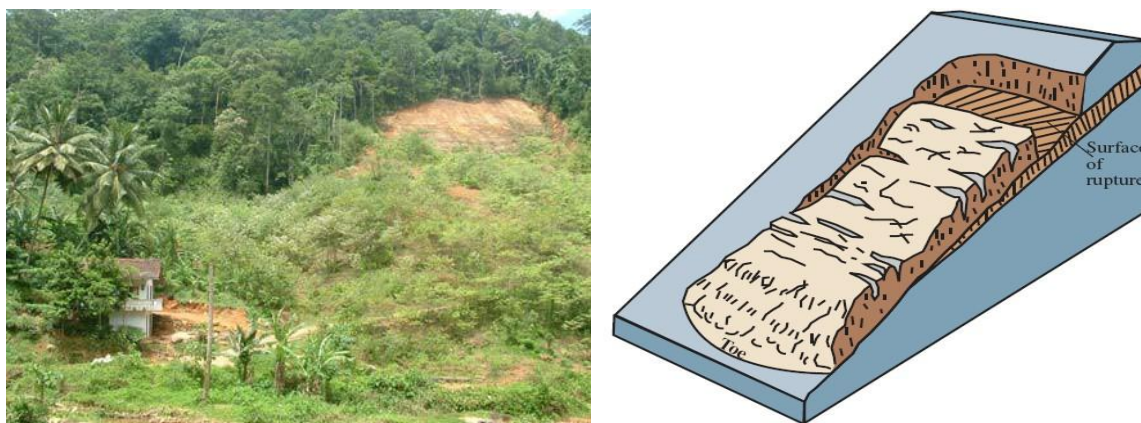


Figura 10. Ejemplo de una falla plana en suelo

Las principales causas de este tipo de movimiento son: el aumento en la inclinación del talud debido a la meteorización y a las fuerzas de filtración, o bien, debido a la erosión en la base de la pendiente.

4.5 Flujos

Los flujos son movimientos de una masa desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas. Para este tipo de movimientos es determinante la granulometría y el grado de saturación que los materiales puedan presentar. En ocasiones un deslizamiento puede evolucionar en un flujo.

De manera simplificada se pueden dividir en:

4.5.1 Flujo de lodos

Los flujos de lodo o de detritos están asociados con la presencia de agua. La pendiente no necesita ser muy grande ya que tratándose de materiales finos saturados estos se comportan como un semifluido viscoso y su movimiento es a través de cauces o barrancas por lo que este proceso será importante donde se encuentren estos rasgos.

4.5.2 Flujo de detritos

Son movimientos rápidos a muy rápidos de detritos húmedos o con alto grado de saturación. Esta forma destructiva de falla del talud está asociada a zonas montañosas donde una precipitación puede movilizar los detritos del manto e incorporarlos en un flujo. El material involucrado puede ser detritos de roca alterada o acumulaciones de material de escombros. Asimismo, en taludes arenosos se pueden presentar flujos secos (Figura 11), que pueden ser detonados por fuerzas sísmicas, vibraciones o cortes en la base.

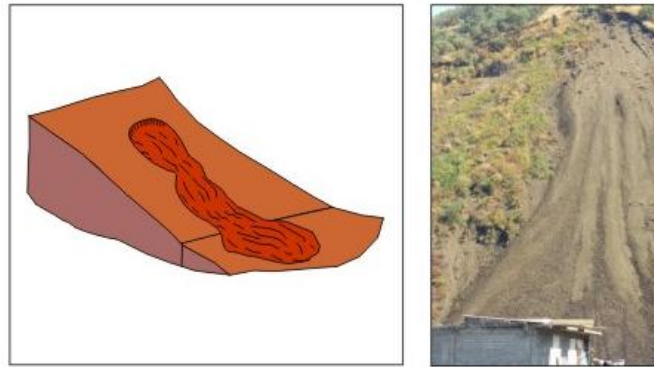


Figura 11. Flujo de detritos, en taludes formados por material granular

4.5.3 Avalancha

Son flujos extremadamente rápidos de detritos secos. Algunos deslizamientos o caídas de roca de gran magnitud se pueden convertir en avalanchas.

4.6 Expansiones laterales

Son movimientos poco frecuentes con un mecanismo de rotura complejo que puede comprender formas de traslación, rotación, flujo y licuación del material.

El término generalmente es utilizado para describir la extensión lateral de masas de suelo o roca compactos, debido a la licuación o fluidización del material subyacente y generalmente la superficie de cizallamiento no está bien definida. Cuando las masas de suelo o roca son relativamente homogéneas, éstas se fracturan en varias unidades y conforman arreglos tipo horse y graben (Figura 12 y Figura 13).

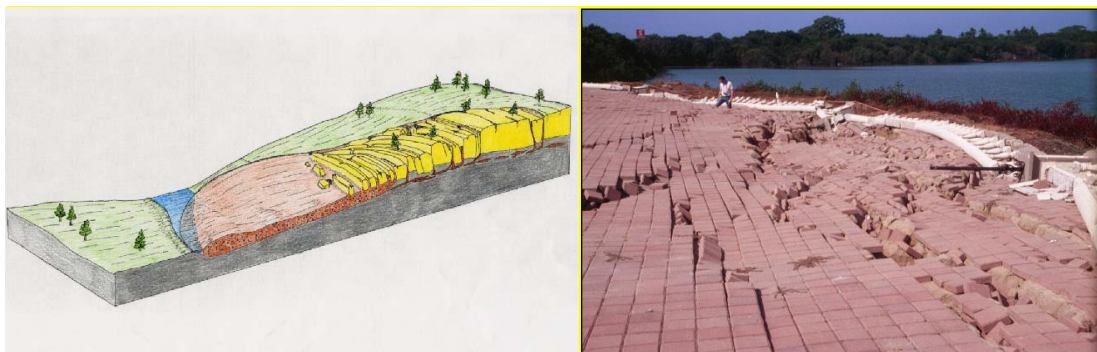


Figura 12. Expansión lateral y licuación en el Puerto de Manzanillo luego del sismo del 21 de enero de 2003, Colima

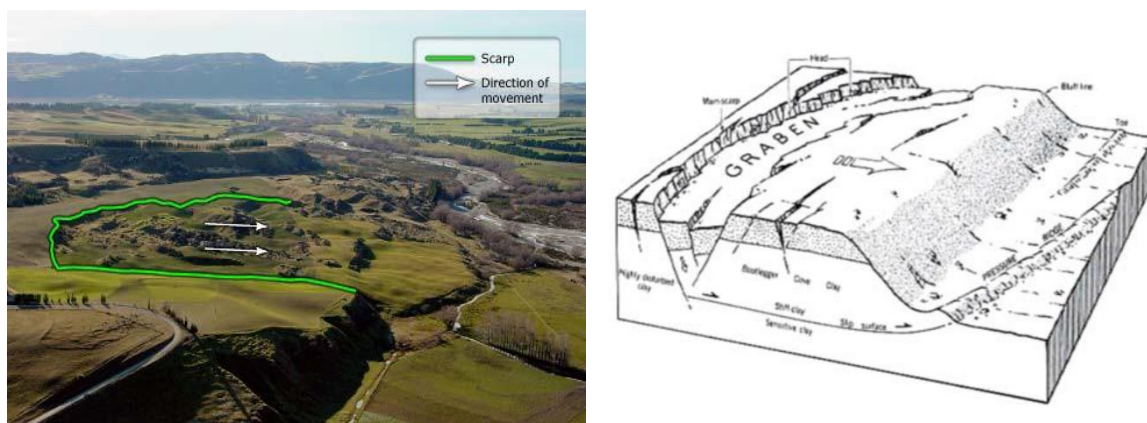


Figura 13. Expansión lateral North Otago (NZ)

4.7 Movimientos complejos

Se refiere a la combinación de dos o más mecanismos de falla. Dependiendo de los mecanismos involucrados se puede tener una combinación de ellos, por ejemplo un deslizamiento rotacional con volteo de bloques al frente, o un deslizamiento que evolucione en un flujo, o un volteo que posteriormente se vuelva una caída o una avalancha (Figura 14).

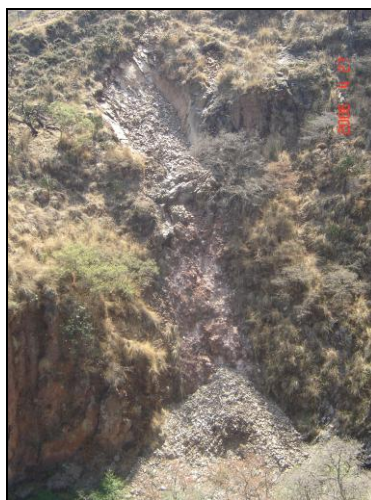


Figura 14. Deslizamiento de detritos que evolucionó en un flujo

4.8 Otros Movimientos

4.8.1 Lahar

Se trata de flujos de lodos y derrubios que se originan en las pendientes de un volcán. Pueden tener rangos enormes tanto de velocidades como de tamaños; desde anchos de centímetros y velocidades de menos de 1 metro por segundo, hasta anchos de cientos de metros y velocidades de decenas de metros por segundo que se desplazan a más de 100km desde la ladera del volcán donde se originan.

4.8.2 Aludes

Son desplazamientos de nieve, hielo y en ocasiones roca, que se desplazan como flujos laminares o turbulentos bajo fuerzas gravitacionales al romperse el equilibrio entre las fuerzas de empuje y la resistencia. Puede desencadenarse por causas internas o externas como vibraciones, movimientos sísmicos y actividad humana.

Las pendientes suelen estar entre los 30 y 60 grados, alcanzando velocidades entre los 50 y 300 km/hora y desarrollando fuerzas de impacto de 145t/m².

4.8.3 Subsistencia

Es el hundimiento local de la superficie del terreno con escaso o ningún movimiento horizontal debido a fallos del terreno y que pueden ocasionar colapsos.

5 Actividad de deslizamientos

Existen muchos aspectos de la actividad de deslizamientos que pueden investigarse y describirse durante las investigaciones sobre el tema. Los términos relacionados con la edad del deslizamiento y su estado o actividad, definido por Varnes (1978) se describen a continuación.

Deslizamientos *activos* son aquellos que continúan moviéndose, incluyen movimientos iniciales y reactivaciones. Un deslizamiento que vuelve a activarse después de haber tenido un período de inactividad se denomina *reactivado*. Los deslizamientos que se han movido durante ciclos anuales o temporadas, pero que no se mueven en el presente, son denominados por Varnes (1978) como *suspendidos*.

Deslizamientos *inactivos* son aquellos que se movían en temporadas anteriores, este estado puede subdividirse. Si las causas del movimiento siguen siendo evidentes, el deslizamiento es *durmiente*. De otro lado, si era causado por la erosión de un río que ha variado de cauce, el deslizamiento es *abandonado* (Hutchinson, 1973; Hutchinson and Gostelow, 1976).. Si el pie del talud se ha protegido contra la erosión y se ha detenido el movimiento, el deslizamiento puede ser descrito como *estabilizado*.

Algunos deslizamientos permanecen visibles en el paisaje por muchos años después de haberse estabilizado. Este tipo de eventos han sido denominados antiguos o fósiles por Zaruba and Mencl (1982). Cuando estos deslizamientos se han cubierto por otros depósitos, generalmente se denominan deslizamientos enterrados. Y otros, que se han desarrollado bajo diferentes condiciones geomorfológicas o climáticas, a través de cientos de años, pueden llamarse *relictos*.

Varnes (1978) definió una serie de términos que pueden ser utilizados para describir la distribución de actividad en un deslizamiento. Si la superficie de ruptura se extiende en la dirección del movimiento, el deslizamiento está *avanzando*, si ocurre lo opuesto es *retrógrado*. Si la superficie se extiende a uno o ambos laterales, el deslizamiento se está *expandiendo* (widening).

El estilo de los deslizamientos o la forma en que varios movimientos contribuyen a un deslizamiento pueden ser también definidos en términos originalmente establecidos por Varnes (1978). El autor define deslizamientos *complejos* como aquellos que combinan al menos dos tipos de movimientos. Adicionalmente, se recomienda que el término *complejo* se limite a casos en los cuales ocurre una secuencia de diferentes movimientos. El término *compuesto*, sinónimo de complejo, se sugiere para describir deslizamientos en que ocurren diferentes tipos de movimiento al mismo tiempo, a menudo simultáneamente. Un deslizamiento *múltiple* es aquel que muestra movimientos repetidos del mismo tipo, alargando la superficie de rotura. Las nuevas masas están en contacto con masas desplazadas previamente y a menudo comparten superficie de rotura. Un movimiento *sucesivo* es idéntico en tipo al múltiple, pero no comparte material desplazado o superficie de ruptura. Un deslizamiento *simple* consiste en un movimiento sencillo de desplazamiento de material, a menudo como un bloque continuo.

Otro importante aspecto a considerar es la escala del movimiento en los deslizamientos. Según la escala modificada de velocidad de deslizamiento de Morgenstern (1985), un límite importante parece estar entre movimientos muy rápidos y extremadamente rápidos, con velocidades similares a las de una persona corriendo (5m/s) y entre movimientos lentos y muy lentos (1.6m/año).

El agua o el hielo, frecuentemente tiene influencia en la reducción del esfuerzo cortante de los materiales que componen las laderas y contribuyen al comportamiento plástico o fluido del suelo. Varnes (1978) sugirió algunas modificaciones a los términos propuestos inicialmente por Radbruch-Hall (1978) para describir el contenido de agua de los materiales deslizados mediante observaciones simples, como seco, húmedo, mojado y muy mojado (*dry, moist, wet and very wet*). Éstos términos son del orden cualitativo, más que cuantitativo.

Según Shroder (1971) y Varnes (1978), el material de un deslizamiento puede describirse como *roca*, un material firme que estaba intacto en su lugar natural antes de iniciarse el movimiento, o *suelo*, un agregado de partículas sólidas, generalmente de minerales y rocas, que fueron transportados o formados por la meteorización en el lugar. Los gases o líquidos llenan los poros del suelo, formando parte del mismo. El suelo se divide en tierra (earth) y escombros (debris). En la primera categoría está el material formado en un 80% o más por partículas menores de 2mm, el límite superior del tamaño de las partículas de arena según geólogos (Bates and Jackson, 1978). Los escombros contienen material grueso, entre el 20 y 80% de las partículas son mayores de 2mm.

6 Agentes Condicionantes Y Detonantes De Procesos De Remoción En Masa

Los factores que controlan los procesos de remoción en masa son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno.

Una forma útil de clasificar los factores que inciden en la estabilidad de las laderas es separarlos en: pasivos (o condicionantes) y activos (detonantes).

Los factores condicionantes o pasivos dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno mientras que los factores desencadenantes o activos se pueden considerar como factores externos que provocan la inestabilidad y que están asociados con la velocidad y magnitud del movimiento.

Los factores activos y pasivos, que intervienen en los procesos de inestabilidad de los taludes (Herrera, 2002) se pueden agrupar en cuatro categorías:

6.1 Características y condiciones geológicas del terreno (pasivas)

Litológicas: Presencia de materiales de baja resistencia, alterados o fracturados.

Estratigráficas: Presencia de capas masivas descansando sobre capas poco competentes, presencia de capas permeables, contraste de rigidez de los materiales.

Estructurales: Echados de discontinuidades muy inclinados, roca fuertemente fracturada debido a: fallamiento, plegamiento, enfriamiento.

Topográficas: Acantilados o fuertes pendientes causados por erosión y/o fallamiento.

6.2 Procesos de tipo geomorfológico (pasivas y activas)

Procesos endógenos (tectónica y vulcanismo).

Procesos exógenos (erosión fluvial y subterránea, remoción de la vegetación por erosión, incendio o sequía, depósito de materiales en forma natural sobre la cresta de taludes).

6.3 Procesos de origen químico, físico y biológico (activas)

Intemperismo de las rocas y suelos, precipitaciones, sismos, contracción y expansión de suelo en discontinuidades, crecimiento de raíces en discontinuidades y congelamiento de agua en discontinuidades, entre los principales.

6.4 Procesos de origen humano o antrópicos (activas)

Excavación en laderas para obras civiles (caminos, viviendas, canales), explotación de canteras. Sobrecarga debido al peso de: material de rezaga de minas y excavaciones, colocación de rellenos, viviendas y terraplenes construidos en la corona y el cuerpo del talud.

Deforestación así como vibraciones del terreno debido a perforaciones, explosiones, paso de vehículos pesados y de maquinaria.

7 Factores que influyen en la aparición de deslizamientos

7.1 Criterios de Clasificación de los Factores

Existen una gran cantidad de factores que tanto aislados, como actuando conjuntamente pueden favorecer la aparición de un deslizamiento con el consiguiente impacto que éste puede producir. Es más, la probabilidad de que se desencadene un deslizamiento será mayor cuanto mayor número de factores actúen simultáneamente.

Sin embargo no es sólo la combinación de los factores lo que desencadena el movimiento, sino que unos factores influyen en otros y ambos conjuntamente constituyen una causa desencadenante; por ejemplo, el tipo de material del que está constituido un terreno proclive a deslizar influye en la pendiente del mismo, y ésta a su vez, puede producir, conjuntamente con el tipo de terreno, la combinación perfecta para que se produzca un deslizamiento.

La clasificación de los factores que influyen en estos fenómenos se puede realizar atendiendo a diversos criterios:

a) Según su influencia en el equilibrio debido a la relación entre la fuerza de la gravedad y la fuerza resistente

Estos factores actúan rompiendo dicho equilibrio desde dos puntos de vista:

1. Aumentando la fuerza de la gravedad al aumentar el peso de la masa propensa a deslizar, por ejemplo, la lluvia, nieve, granizo y la acumulación de derrubios volcánicos, o la actividad humana en la construcción de almacenes de minerales o rocas, vertederos, pesadas edificaciones y otras estructuras, fugas de agua de tuberías, alcantarillas, roturas de depósitos, etc..

2. Disminuyendo la resistencia del terreno de diversos modos:

- Disminuyendo o eliminando el soporte lateral, efecto que realizan factores como el poder erosivo de la lluvia, las corrientes, glaciares, oleaje o por la actividad humana tal como la construcción de obras lineales, la eliminación de muros de contención o la disminución del nivel en los embalses

- Vibraciones en el terreno producidas por terremotos y explosiones, maquinaria y tráfico por carretera y aire

- Disminución del soporte del subsuelo debido a la disolución de materiales granulares y solubles (actividad kárstica), minería, pérdida de resistencia o colapso del material

- Aumento de la presión lateral en grietas y cavernas debido a la congelación del agua en las mismas, hidratación de minerales y movilización de tensiones residuales

b) Según el tiempo de influencia

1. Permanentes: aquellos, tales como las características del terreno, que permanecen sin cambio o que varían muy poco desde el punto de vista de la perspectiva humana, como pueden ser la geología y la topografía.

2. Variables: aquellos, relacionados con las características del entorno, que cambian rápidamente como resultado de alguna variación en dicho entorno como, por ejemplo, vibración del suelo debida a terremotos, rápida elevación del nivel de las aguas subterráneas, mayor cantidad en la humedad del suelo debido a intensas precipitaciones, etc.

c) Según su campo de acción

1. Geometría: aquellos que cambian la geometría del terreno, por ejemplo: erosión hídrica o eólica, acción humana, etc.

2. Material: aquellos factores que afectan al material debilitándolo, por ejemplo: erosión interior, daño, degradación química, meteorización, etc.

3. Tensiones: se dividen en aquellos que afectan a las tensiones totales, tales como las fuerzas externas debidas a la acción humana, a los terremotos y a la lluvia; y aquellos que afectan a las presiones intersticiales provocando el aumento de las mismas como es el caso de las precipitaciones y los terremotos.

ANEXO C

DATOS DE PRECIPITACIÓN UTILIZADOS EN LA GENERACIÓN DE UMBRALES DE LLUVIA DETONANTE DE DESLIZAMIENTOS

Contenido

TABLA 1. EVENTOS DE LLUVIA DETONANTE	2
TABLA 2. LLUVIA ANTECEDENTE PARA DIFERENTES INTERVALOS	6

Tabla 1. Eventos de lluvia detonante

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	Magnitud (mm)	Duracion(min)	Duracion(hora)	Intensidad(mm/hora)
1	31/01/2003	30/01/2003	9,12	50	0,83	10,94
2	18/02/2003	17/02/2003	36,07	255	4,25	8,49
3	18/03/2003	19/03/2003	80,74	340	5,67	14,25
4	02/04/2003	30/03/2003	9,64	130	2,17	4,45
5	10/04/2003	09/04/2003	18,51	135	2,25	8,23
6	12/04/2003	12/04/2003	34	200	3,33	10,20
7	22/04/2003	21/04/2003	30,2	250	4,17	7,25
8	01/05/2003	24/04/2003	21,82	90	1,50	14,55
9	17/06/2003	02/06/2003	7,01	285	4,75	1,48
10	30/08/2003	22/08/2003	18,76	145	2,42	7,76
11	10/09/2003	09/09/2003	21,75	330	5,50	3,95
12	18/09/2003	18/09/2003	17,5	90	1,50	11,67
13	10/10/2003	08/10/2003	14	150	2,50	5,60
14	21/10/2003	19/10/2003	18	95	1,58	11,37
15	29/10/2003	29/10/2003	75,75	580	9,67	7,84
16	07/11/2003	07/11/2003	36	180	3,00	12,00
17	20/11/2003	20/11/2003	13,72	95	1,58	8,67
18	01/12/2003	25/11/2003	45,47	155	2,58	17,60
19	04/12/2003	03/12/2003	49,03	140	2,33	21,01
20	09/01/2004	09/01/2004	43,93	495	8,25	5,32
21	19/01/2004	16/01/2004	13,72	85	1,42	9,68
22	19/02/2004	19/02/2004	14,74	65	1,08	13,61
23	27/03/2004	27/03/2004	59,71	200	3,33	17,91
24	04/04/2004	03/04/2004	23,87	80	1,33	17,90
25	15/04/2004	15/04/2004	34,04	395	6,58	5,17
26	28/04/2004	20/04/2004	18,29	100	1,67	10,97
27	21/05/2004	21/05/2004	19,3	190	3,17	6,09
28	01/06/2004	25/05/2004	14,48	50	0,83	17,38
29	10/09/2004	10/09/2004	19,3	270	4,50	4,29
30	08/10/2004	04/10/2004	8,39	110	1,83	4,58
31	14/10/2004	12/10/2004	13,21	150	2,50	5,28
32	20/10/2004	20/10/2004	31,75	135	2,25	14,11
33	09/11/2004	08/11/2004	17,78	215	3,58	4,96
34	18/11/2004	13/11/2004	14,98	160	2,67	5,62
35	29/11/2004	27/11/2004	12,7	45	0,75	16,93
36	03/12/2004	01/12/2004	11,68	80	1,33	8,76
37	17/12/2004	13/12/2004	26,42	85	1,42	18,65
38	14/01/2005	14/01/2005	74,42	245	4,08	18,23
39	26/01/2005	16/01/2005	21,84	180	3,00	7,28
40	31/01/2005	20/01/2005	15,24	190	3,17	4,81
41	22/02/2005	11/02/2005	26,67	225	3,75	7,11
42	28/02/2005	28/02/2005	59,69	635	10,58	5,64
43	03/03/2005	03/03/2005	16	160	2,67	6,00
44	17/03/2005	16/03/2005	10,16	135	2,25	4,52
45	23/04/2005	23/04/2005	31,5	90	1,50	21,00

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	Magnitud (mm)	Duracion(min)	Duracion(hora)	Intensidad(mm/hora)
46	24/04/2005	24/04/2005	35,05	285	4,75	7,38
47	02/05/2005	02/05/2005	25,65	230	3,83	6,69
48	12/05/2005	02/05/2005	25,65	230	3,83	6,69
49	17/05/2005	15/05/2005	16,26	125	2,08	7,80
50	23/05/2005	23/05/2005	26,46	140	2,33	11,34
51	06/06/2005	05/06/2005	20,83	105	1,75	11,90
52	10/06/2005	10/06/2005	50,3	245	4,08	12,32
53	21/07/2005	06/07/2005	14,73	205	3,42	4,31
54	18/08/2005	15/08/2005	11,43	175	2,92	3,92
55	24/08/2005	24/08/2005	14,73	210	3,50	4,21
56	15/09/2005	03/09/2005	11,17	160	2,67	4,19
57	14/10/2005	13/10/2005	42,42	190	3,17	13,40
58	27/10/2005	23/10/2005	38,36	350	5,83	6,58
59	28/10/2005	28/10/2005	44,2	375	6,25	7,07
60	15/11/2005	15/11/2005	17,78	65	1,08	16,41
61	21/11/2005	21/11/2005	39,62	415	6,92	4,44
62	28/11/2005	22/11/2005	39,62	415	6,92	5,73
63	06/12/2005	06/12/2005	22,61	105	1,75	12,92
64	14/12/2005	14/12/2005	17,78	75	1,25	14,22
65	15/12/2005	15/12/2005	23,37	105	1,75	13,35
66	19/12/2005	19/12/2005	24,9	215	3,58	6,95
67	05/01/2006	05/01/2006	28,7	280	4,67	6,15
68	17/01/2006	07/01/2006	22,61	340	5,67	4,85
69	19/03/2006	15/03/2006	25,9	220	3,67	7,06
70	15/04/2006	09/04/2006	19,3	130	2,17	8,91
71	18/04/2006	13/04/2006	22,58	155	2,58	8,74
72	09/05/2006	04/05/2006	16	160	2,67	6,00
73	14/05/2006	29/04/2006	20,83	155	2,58	8,06
74	05/06/2006	04/06/2006	31,75	240	4,00	7,94
75	01/09/2006	01/09/2006	20,57	185	3,08	6,67
76	17/09/2006	17/09/2006	18,03	35	0,58	30,91
77	07/10/2006	21/09/2006	17,02	35	0,58	29,18
78	14/10/2006	13/10/2006	22,62	125	2,08	10,86
79	19/10/2006	19/10/2006	28,71	155	2,58	11,11
80	26/10/2006	25/10/2006	14,98	30	0,50	29,96
81	31/10/2006	30/10/2006	8,64	65	1,08	7,98
82	07/11/2006	03/11/2006	12,7	30	0,50	25,40
83	11/11/2006	08/11/2006	13,72	130	2,17	6,33
84	21/11/2006	21/11/2006	17,53	155	2,58	6,79
85	28/11/2006	08/11/2006	13,72	130	2,17	6,33
86	13/12/2006	08/12/2006	40,64	140	2,33	17,42
87	19/12/2006	19/12/2006	8,13	90	1,50	5,42
88	26/12/2006	26/12/2006	12,45	80	1,33	9,34
89	09/01/2007	09/01/2007	32,51	125	2,08	15,60
90	19/01/2007	19/01/2007	14,22	65	1,08	13,13
91	16/04/2007	03/04/2007	40,64	265	4,42	9,20

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	Magnitud (mm)	Duracion(min)	Duracion(hora)	Intensidad(mm/hora)
92	24/04/2007	07/04/2007	27,68	120	2,00	13,84
93	30/04/2007	24/04/2007	16,25	100	1,67	9,75
94	10/05/2007	01/05/2007	34,55	210	3,50	9,87
95	24/05/2007	07/05/2007	21,59	195	3,25	6,64
96	07/06/2007	31/05/2007	30,23	375	6,25	4,84
97	24/07/2007	24/07/2007	21,34	145	2,42	8,83
98	20/09/2007	15/09/2007	18,8	250	4,17	4,51
99	13/10/2007	13/10/2007	53,6	210	3,50	15,31
100	18/10/2007	18/10/2007	35,31	175	2,92	12,11
101	21/10/2007	21/10/2007	27,18	225	3,75	7,25
102	01/11/2007	29/10/2007	24,89	80	1,33	18,67
103	20/02/2008	20/02/2008	25,91	220	3,67	7,07
104	10/03/2008	10/03/2008	29,21	265	4,42	6,61
105	30/03/2008	30/03/2008	21,84	40	0,67	32,76
106	31/03/2008	31/03/2008	26,92	335	5,58	4,82
107	09/04/2008	09/04/2008	36,32	140	2,33	15,57
108	23/04/2008	23/04/2008	27,17	150	2,50	10,87
109	05/05/2008	05/05/2008	21,08	110	1,83	11,50
110	24/05/2008	24/05/2008	45,21	170	2,83	15,96
111	25/05/2008	25/05/2008	45,21	170	2,83	15,96
112	27/05/2008	27/05/2008	43,95	325	5,42	8,11
113	18/06/2008	14/06/2008	17,78	50	0,83	21,34
114	01/07/2008	25/06/2008	14,99	255	4,25	3,53
115	16/07/2008	08/07/2008	7,87	30	0,50	15,74
116	01/08/2008	01/08/2008	9,9	115	1,92	5,17
117	16/08/2008	16/08/2008	18,54	320	5,33	3,48
118	24/08/2008	22/08/2008	12,7	185	3,08	4,12
119	04/09/2008	02/09/2008	24,38	160	2,67	9,14
120	16/09/2008	15/09/2008	16,51	105	1,75	9,43
121	09/10/2008	09/10/2008	30,23	150	2,50	12,09
122	20/10/2008	14/10/2008	8,38	70	1,17	7,18
123	01/11/2008	01/11/2008	34,04	350	5,83	5,84
124	15/11/2008	15/11/2008	126,24	765	12,75	9,90
125	09/12/2008	26/11/2008	34,55	370	6,17	5,60
126	20/12/2008	20/12/2008	30,73	255	4,25	7,23
127	15/01/2009	29/12/2008	16,51	110	1,83	9,01
128	19/01/2009	19/01/2009	35,3	265	4,42	7,99
129	25/01/2009	25/01/2009	45,72	450	7,50	6,10
130	09/02/2009	09/02/2009	12,45	75	1,25	9,96
131	06/03/2009	19/02/2009	18,29	50	0,83	21,95
132	17/03/2009	17/03/2009	10,67	130	2,17	4,92
133	21/03/2009	21/03/2009	13,97	90	1,50	9,31
134	24/03/2009	24/03/2009	43,94	155	2,58	17,01
135	08/04/2009	07/04/2009	19,3	80	1,33	14,48
136	20/04/2009	14/04/2009	7,37	75	1,25	5,90
137	08/05/2009	04/05/2009	24,13	320	5,33	4,52

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	Magnitud (mm)	Duracion(min)	Duracion(hora)	Intensidad(mm/hora)
138	08/06/2009	08/06/2009	32,26	510	8,50	3,80
139	15/06/2009	14/06/2009	23,37	280	4,67	5,01
140	26/06/2009	21/06/2009	36,83	265	4,42	8,34
141	03/07/2009	24/06/2009	13,2	60	1,00	13,20
142	02/11/2009	02/11/2009	51,06	340	5,67	9,01
143	08/04/2010	08/04/2010	36,58	275	4,58	7,98
144	22/05/2010	04/05/2010	24,39	235	3,92	6,23
145	22/06/2010	20/06/2010	52,08	495	8,25	6,31
146	01/10/2010	20/09/2010	37,33	295	4,92	7,59
147	04/10/2010	04/10/2010	28,67	165	2,75	10,43
148	19/10/2010	08/10/2010	31,27	215	3,58	8,73
149	28/10/2010	28/10/2010	32,25	110	1,83	17,59
150	17/11/2010	17/11/2010	31,77	470	7,83	4,06
151	04/12/2010	02/12/2010	31,74	455	7,58	4,19
152	15/12/2010	15/12/2010	28,44	110	1,83	15,51
153	06/02/2011	06/02/2011	64,77	175	2,92	22,21
154	02/03/2011	02/03/2011	47,5	185	3,08	15,41
155	03/03/2011	03/03/2011	50,8	85	1,42	35,86
156	22/03/2011	09/03/2011	25,91	120	2,00	12,96
157	12/04/2011	06/04/2011	11,69	55	0,92	12,75
158	26/04/2011	22/04/2011	30,73	225	3,75	8,19
159	19/05/2011	14/05/2011	54,86	525	8,75	6,27
160	22/06/2011	02/06/2011	39,88	275	4,58	8,70
161	30/08/2011	28/08/2011	17,78	40	0,67	26,67
162	09/09/2011	09/09/2011	26,67	205	3,42	7,81
163	15/09/2011	10/09/2011	19,56	90	1,50	13,04
164	16/10/2011	16/10/2011	28,97	220	3,67	7,90
165	18/10/2011	14/10/2011	30,48	190	3,17	9,63
166	05/11/2011	05/11/2011	17,8	180	3,00	5,93
167	22/11/2011	22/11/2011	32,8	350	5,83	5,62
168	28/11/2011	28/11/2011	54,94	290	4,83	11,37
169	05/12/2011	05/12/2011	56,22	560	9,33	6,02
170	14/12/2011	14/12/2011	33,56	300	5,00	6,71

Tabla 2. Lluvia antecedente para diferentes intervalos

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	P01D	P03D	P07D	P15D	P21D	P25D	P30D
1	31/01/2003	30/01/2003	1,51	10,63	11,38	58,50	60,27	60,27	61,02
2	18/02/2003	17/02/2003	12,42	64,17	101,19	125,51	136,14	136,89	136,89
3	18/03/2003	19/03/2003	68,85	91,14	141,19	141,44	168,99	169,99	227,55
4	02/04/2003	30/03/2003	0,00	3,54	20,27	54,09	195,28	195,28	195,53
5	10/04/2003	09/04/2003	2,79	39,50	52,44	72,71	79,47	195,39	247,72
6	12/04/2003	12/04/2003	41,20	43,99	92,89	107,07	115,41	147,73	283,63
7	22/04/2003	21/04/2003	1,60	48,77	72,39	213,69	226,63	240,06	248,40
8	01/05/2003	24/04/2003	0,00	0,00	30,18	133,94	235,74	287,43	288,18
9	17/06/2003	02/06/2003	3,00	3,25	4,00	9,00	29,13	39,03	39,03
10	30/08/2003	22/08/2003	0,00	11,14	14,40	72,94	80,96	91,21	120,43
11	10/09/2003	09/09/2003	3,00	26,00	42,25	55,90	91,92	115,19	123,21
12	18/09/2003	18/09/2003	18,75	18,75	25,00	73,75	78,58	87,65	143,42
13	10/10/2003	08/10/2003	7,75	39,50	91,75	117,05	145,30	165,30	178,05
14	21/10/2003	19/10/2003	7,00	42,50	63,25	138,75	169,00	180,75	210,30
15	29/10/2003	29/10/2003	46,75	128,50	147,75	211,00	248,00	303,50	317,75
16	07/11/2003	07/11/2003	36,50	38,25	38,25	230,25	273,00	305,50	330,50
17	20/11/2003	20/11/2003	22,86	23,88	34,80	124,68	167,18	298,43	317,68
18	01/12/2003	25/11/2003	18,03	31,49	81,02	109,73	144,78	209,78	211,53
19	04/12/2003	03/12/2003	14,47	106,17	137,66	214,88	226,82	252,45	317,70
20	09/01/2004	09/01/2004	35,81	58,16	65,53	84,83	92,71	92,71	111,50
21	19/01/2004	16/01/2004	0,00	0,25	18,29	97,28	97,28	116,58	124,46
22	19/02/2004	19/02/2004	19,82	22,12	24,40	24,66	24,66	24,66	63,26
23	27/03/2004	27/03/2004	65,55	68,09	70,63	70,63	84,34	104,92	109,49
24	04/04/2004	03/04/2004	0,00	28,70	59,94	135,15	135,15	135,40	163,60
25	15/04/2004	15/04/2004	44,96	66,81	98,30	144,52	238,52	242,59	242,59
26	28/04/2004	20/04/2004	5,08	13,97	27,18	124,72	171,95	172,97	210,05
27	21/05/2004	21/05/2004	21,09	43,69	57,66	63,25	105,92	128,27	141,48
28	01/06/2004	25/05/2004	0,00	10,41	29,46	97,03	104,65	106,68	148,08
29	10/09/2004	10/09/2004	7,11	19,55	58,67	81,53	82,80	85,34	85,34
30	08/10/2004	04/10/2004	1,02	13,97	32,51	70,11	83,57	97,54	130,56
31	14/10/2004	12/10/2004	5,08	15,23	17,26	50,53	86,35	95,74	113,27
32	20/10/2004	20/10/2004	37,84	52,79	66,76	91,89	112,21	144,72	153,87
33	09/11/2004	08/11/2004	5,58	34,79	70,87	95,76	170,18	194,02	210,01
34	18/11/2004	13/11/2004	0,26	10,16	57,41	136,15	147,33	176,79	237,24
35	29/11/2004	27/11/2004	0,25	22,86	42,93	58,17	119,12	180,35	192,03
36	03/12/2004	01/12/2004	0,00	20,83	43,69	67,31	116,59	139,95	203,46
37	17/12/2004	13/12/2004	6,35	11,43	53,35	81,79	125,48	145,55	149,36
38	14/01/2005	14/01/2005	74,42	76,96	81,79	93,73	115,32	115,57	123,96
39	26/01/2005	16/01/2005	0,00	0,00	36,83	151,89	156,72	168,66	174,75
40	31/01/2005	20/01/2005	0,00	13,97	13,97	63,25	170,69	170,69	182,63
41	22/02/2005	11/02/2005	0,00	7,37	14,74	71,38	77,47	92,46	92,46
42	28/02/2005	28/02/2005	55,38	59,69	59,69	74,43	131,07	133,10	147,83
43	03/03/2005	03/03/2005	17,02	19,30	78,99	86,61	126,75	152,40	156,46
44	17/03/2005	16/03/2005	1,77	11,93	11,93	56,64	118,61	125,98	133,35
45	23/04/2005	23/04/2005	31,50	31,50	32,77	47,25	51,82	58,17	118,87

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	P01D	P03D	P07D	P15D	P21D	P25D	P30D
46	24/04/2005	24/04/2005	35,56	67,06	68,07	77,22	87,38	93,73	154,43
47	02/05/2005	02/05/2005	29,46	53,08	83,05	159,25	165,35	176,27	178,56
48	12/05/2005	02/05/2005	0,00	0,00	23,36	122,17	200,15	201,16	204,47
49	17/05/2005	15/05/2005	5,58	35,55	43,94	85,85	167,13	244,09	245,10
50	23/05/2005	23/05/2005	26,71	36,81	49,51	88,12	129,78	204,20	256,52
51	06/06/2005	05/06/2005	12,19	43,68	48,75	80,80	103,60	141,96	153,64
52	10/06/2005	10/06/2005	58,16	69,59	122,93	129,78	170,15	182,85	221,21
53	21/07/2005	06/07/2005	0,00	4,32	8,13	39,63	63,76	72,39	74,68
54	18/08/2005	15/08/2005	0,00	26,92	52,83	59,43	59,43	59,43	59,69
55	24/08/2005	24/08/2005	15,49	17,78	22,10	74,93	81,53	81,53	81,53
56	15/09/2005	03/09/2005	0,00	0,00	0,25	21,84	22,35	40,13	54,86
57	14/10/2005	13/10/2005	20,57	63,50	96,27	198,37	236,73	257,56	259,09
58	27/10/2005	23/10/2005	4,83	162,82	228,35	337,07	372,37	422,41	479,30
59	28/10/2005	28/10/2005	44,45	180,09	268,99	338,84	414,54	447,56	516,64
60	15/11/2005	15/11/2005	23,87	46,99	75,15	117,82	310,36	399,26	430,76
61	21/11/2005	21/11/2005	40,64	59,44	107,44	180,82	201,39	258,29	471,15
62	28/11/2005	22/11/2005	0,00	7,37	52,83	179,07	233,40	250,16	263,88
63	06/12/2005	06/12/2005	22,86	51,82	67,31	120,14	203,71	250,95	300,96
64	14/12/2005	14/12/2005	19,05	30,48	38,10	105,41	118,62	209,30	265,68
65	15/12/2005	15/12/2005	23,37	44,96	54,10	113,29	141,99	222,25	265,18
66	19/12/2005	19/12/2005	19,05	27,94	87,38	134,88	171,20	184,41	275,09
67	05/01/2006	05/01/2006	61,97	84,07	84,32	99,56	162,30	216,15	223,77
68	17/01/2006	07/01/2006	1,53	9,15	18,29	147,83	154,69	156,46	202,69
69	19/03/2006	15/03/2006	0,00	26,66	74,66	125,74	141,49	147,84	151,14
70	15/04/2006	09/04/2006	14,27	41,91	84,34	126,00	150,64	231,41	258,58
71	18/04/2006	13/04/2006	10,67	20,56	72,89	130,56	157,74	193,55	252,48
72	09/05/2006	04/05/2006	19,82	26,67	81,79	144,28	171,94	206,77	253,98
73	14/05/2006	29/04/2006	0,00	17,27	52,58	130,30	177,29	199,14	238,77
74	05/06/2006	04/06/2006	4,82	50,80	78,23	92,45	115,06	134,87	176,27
75	01/09/2006	01/09/2006	20,82	21,08	33,52	54,51	59,08	62,64	62,64
76	17/09/2006	17/09/2006	20,32	24,13	26,42	42,68	67,82	87,87	88,38
77	07/10/2006	21/09/2006	0,00	0,00	19,55	33,02	83,05	89,15	89,66
78	14/10/2006	13/10/2006	12,19	49,78	60,46	83,57	90,94	114,30	147,32
79	19/10/2006	19/10/2006	41,91	67,31	144,53	164,86	187,97	194,07	218,70
80	26/10/2006	25/10/2006	1,27	16,51	44,45	198,63	209,31	228,10	232,42
81	31/10/2006	30/10/2006	11,18	30,48	50,04	145,29	238,26	242,84	261,63
82	07/11/2006	03/11/2006	2,28	5,59	56,89	106,93	196,34	251,46	299,73
83	11/11/2006	08/11/2006	6,10	13,46	40,39	124,97	168,91	231,14	314,20
84	21/11/2006	21/11/2006	12,70	24,90	41,15	104,14	158,75	192,03	232,92
85	28/11/2006	08/11/2006	1,52	1,52	7,36	55,88	109,22	114,81	196,34
86	13/12/2006	08/12/2006	3,55	13,97	86,86	126,49	132,33	158,75	182,37
87	19/12/2006	19/12/2006	8,64	8,64	25,40	126,24	148,34	151,64	177,80
88	26/12/2006	26/12/2006	12,45	39,12	66,80	102,11	193,04	214,63	216,66
89	09/01/2007	09/01/2007	49,02	49,28	49,78	69,60	123,95	134,11	159,77
90	19/01/2007	19/01/2007	15,75	17,28	41,41	92,71	99,32	112,53	142,24
91	16/04/2007	03/04/2007	3,81	4,06	27,18	129,29	154,69	176,28	222,50

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	P01D	P03D	P07D	P15D	P21D	P25D	P30D
92	24/04/2007	07/04/2007	21,08	36,32	87,63	115,32	170,18	231,14	256,29
93	30/04/2007	24/04/2007	7,87	12,95	47,49	118,36	141,73	176,27	243,84
94	10/05/2007	01/05/2007	3,56	17,27	42,93	111,76	190,25	210,82	215,14
95	24/05/2007	07/05/2007	1,78	15,24	46,48	73,41	112,78	170,18	188,72
96	07/06/2007	31/05/2007	1,27	5,59	32,26	107,70	152,40	164,34	184,66
97	24/07/2007	24/07/2007	21,85	39,63	53,85	72,65	93,22	93,48	108,72
98	20/09/2007	15/09/2007	0,00	8,89	29,97	43,43	51,30	59,94	106,17
99	13/10/2007	13/10/2007	53,85	71,12	113,54	183,39	228,35	240,80	261,88
100	18/10/2007	18/10/2007	42,16	45,97	124,21	208,03	243,33	286,77	300,74
101	21/10/2007	21/10/2007	30,23	63,25	119,64	236,73	288,55	313,44	351,79
102	01/11/2007	29/10/2007	12,95	52,32	168,14	274,82	356,87	387,35	451,36
103	20/02/2008	20/02/2008	29,21	65,28	94,49	123,19	189,48	209,80	258,06
104	10/03/2008	10/03/2008	40,89	57,40	103,63	154,68	232,41	271,78	300,48
105	30/03/2008	30/03/2008	28,96	54,87	61,22	76,71	153,67	204,72	233,43
106	31/03/2008	31/03/2008	29,21	63,76	90,17	105,41	141,99	203,45	256,79
107	09/04/2008	09/04/2008	37,59	42,41	49,02	145,03	153,41	161,03	197,10
108	23/04/2008	23/04/2008	27,43	45,72	47,75	181,61	193,04	257,30	289,30
109	05/05/2008	05/05/2008	22,10	49,53	80,77	149,61	156,72	242,32	292,61
110	24/05/2008	24/05/2008	55,37	97,53	150,11	165,35	211,33	243,33	263,14
111	25/05/2008	25/05/2008	9,65	73,66	155,70	175,00	199,64	252,47	266,95
112	27/05/2008	27/05/2008	19,81	81,53	191,76	245,87	249,42	298,95	330,96
113	18/06/2008	14/06/2008	2,28	12,95	47,24	67,82	111,25	215,64	334,00
114	01/07/2008	25/06/2008	3,55	11,43	37,08	77,21	120,90	129,79	156,97
115	16/07/2008	08/07/2008	2,79	13,97	24,13	67,31	87,37	118,61	144,52
116	01/08/2008	01/08/2008	10,92	17,52	20,83	36,07	58,42	82,55	102,87
117	16/08/2008	16/08/2008	13,97	32,00	63,24	83,05	103,37	103,88	119,12
118	24/08/2008	22/08/2008	4,06	29,46	41,39	116,57	120,88	153,90	157,21
119	04/09/2008	02/09/2008	7,11	62,23	87,12	158,99	198,62	237,99	242,30
120	16/09/2008	15/09/2008	2,80	19,31	26,17	91,95	135,63	166,37	194,30
121	09/10/2008	09/10/2008	30,99	35,31	44,70	93,73	116,84	145,29	152,15
122	20/10/2008	14/10/2008	2,79	16,51	39,11	105,41	130,30	156,97	162,30
123	01/11/2008	01/11/2008	49,78	49,78	85,85	113,03	146,30	191,77	205,48
124	15/11/2008	15/11/2008	46,48	192,28	203,96	287,27	323,34	333,25	355,85
125	09/12/2008	26/11/2008	0,00	5,85	20,07	136,91	176,28	238,51	393,45
126	20/12/2008	20/12/2008	62,73	89,90	104,64	118,61	171,69	227,06	268,47
127	15/01/2009	29/12/2008	0,26	0,26	1,02	31,75	86,87	88,90	210,31
128	19/01/2009	19/01/2009	38,61	44,45	60,46	91,95	91,95	147,07	174,76
129	25/01/2009	25/01/2009	42,42	48,77	104,65	126,50	157,99	157,99	209,55
130	09/02/2009	09/02/2009	12,45	25,15	26,68	34,29	100,33	160,53	160,79
131	06/03/2009	19/02/2009	4,83	5,59	8,89	33,28	77,22	107,95	134,63
132	17/03/2009	17/03/2009	13,97	28,19	41,15	48,51	55,12	75,18	107,69
133	21/03/2009	21/03/2009	13,97	28,19	41,15	48,51	55,12	75,18	107,69
134	24/03/2009	24/03/2009	15,75	28,96	59,69	74,42	83,31	86,62	107,70
135	08/04/2009	07/04/2009	11,17	26,92	56,64	113,03	187,45	218,18	231,14
136	20/04/2009	14/04/2009	4,82	4,82	25,40	76,45	109,98	123,95	208,02
137	08/05/2009	04/05/2009	0,00	3,30	61,48	91,96	102,37	122,95	147,08

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	P01D	P03D	P07D	P15D	P21D	P25D	P30D
138	08/06/2009	08/06/2009	13,46	33,02	57,40	65,28	70,10	87,63	106,44
139	15/06/2009	14/06/2009	0,25	34,03	53,34	110,74	118,11	121,41	132,85
140	26/06/2009	21/06/2009	4,07	19,56	66,80	117,60	167,39	191,77	197,87
141	03/07/2009	24/06/2009	0,00	3,30	6,60	73,40	121,66	140,97	198,37
142	02/11/2009	02/11/2009	53,85	79,25	150,37	185,93	274,57	280,42	290,32
143	08/04/2010	08/04/2010	36,83	53,09	90,93	110,49	111,76	122,43	155,96
144	22/05/2010	04/05/2010	0,00	14,23	22,61	30,74	102,11	121,16	148,59
145	22/06/2010	20/06/2010	10,66	47,49	101,61	145,03	169,90	215,87	250,16
146	01/10/2010	20/09/2010	0,00	8,88	38,60	109,19	132,80	146,79	181,84
147	04/10/2010	04/10/2010	17,27	56,62	67,28	155,40	181,81	189,42	226,54
148	19/10/2010	08/10/2010	3,81	30,73	38,09	88,88	154,38	184,10	244,28
149	28/10/2010	28/10/2010	33,27	88,14	142,74	193,28	231,89	261,34	309,57
150	17/11/2010	17/11/2010	31,48	70,33	102,85	181,09	296,39	396,21	422,12
151	04/12/2010	02/12/2010	17,27	65,02	89,65	171,69	283,18	308,32	356,84
152	15/12/2010	15/12/2010	29,46	92,69	112,24	208,24	240,75	284,18	379,15
153	06/02/2011	06/02/2011	66,29	66,55	67,31	68,58	71,37	73,91	74,42
154	02/03/2011	02/03/2011	60,45	122,68	185,68	290,83	347,47	443,99	445,01
155	03/03/2011	03/03/2011	52,58	151,90	215,14	322,33	398,28	430,28	496,83
156	22/03/2011	09/03/2011	1,52	14,48	46,23	113,03	252,47	321,56	400,30
157	12/04/2011	06/04/2011	16,26	34,80	69,85	89,92	124,21	142,75	171,96
158	26/04/2011	22/04/2011	0,00	14,22	101,85	209,04	262,63	278,38	292,86
159	19/05/2011	14/05/2011	4,06	27,69	95,51	122,95	138,44	175,02	265,44
160	22/06/2011	02/06/2011	11,94	14,74	14,99	16,01	95,51	133,61	154,18
161	30/08/2011	28/08/2011	0,00	25,40	29,97	90,42	102,11	102,11	127,51
162	09/09/2011	09/09/2011	26,92	45,97	46,99	74,42	118,87	137,41	149,10
163	15/09/2011	10/09/2011	0,25	0,51	54,10	74,17	101,60	128,27	159,26
164	16/10/2011	16/10/2011	31,01	90,70	146,07	188,74	212,36	250,46	298,72
165	18/10/2011	14/10/2011	12,96	73,93	156,22	225,06	254,77	276,87	312,43
166	05/11/2011	05/11/2011	1,27	17,80	38,12	82,09	157,29	239,58	286,32
167	22/11/2011	22/11/2011	33,56	56,44	137,56	222,49	275,64	305,88	329,52
168	28/11/2011	28/11/2011	55,96	72,23	131,47	235,97	320,40	373,05	393,37
169	05/12/2011	05/12/2011	49,86	68,42	124,10	267,52	360,07	404,83	479,35
170	14/12/2011	14/12/2011	20,34	42,46	50,08	184,11	295,50	354,48	436,10